

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA:**  
**INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**  
**INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:**  
**CONVERSIÓN DE UN SISTEMA ELÉCTRICO MONOFÁSICO A TRIFÁSICO**  
**BALANCEADO MEDIANTE ELEMENTOS PASIVOS COMO ALTERNATIVA**  
**PARA ENERGIZACIÓN DE EQUIPOS**

**AUTOR:**  
**BRUNO FABRICIO MASABANDA PINZA**

**TUTOR:**  
**ROGELIO ALFREDO ORIZONDO MARTÍNEZ**

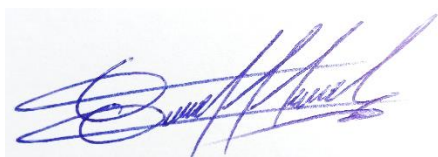
**Quito D.M., febrero de 2021**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Bruno Fabricio Masabanda Pinza, con documento de identificación N° 1723598809, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *CONVERSIÓN DE UN SISTEMA ELÉCTRICO MONOFÁSICO A TRIFÁSICO BALANCEADO MEDIANTE ELEMENTOS PASIVOS COMO ALTERNATIVA PARA ENERGIZACIÓN DE EQUIPOS*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., febrero de 2021



.....

Bruno Fabricio Masabanda Pinza

C.C.: 1723598809

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Rogelio Alfredo Orizondo Martínez declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *CONVERSIÓN DE UN SISTEMA ELÉCTRICO MONOFÁSICO A TRIFÁSICO BALANCEADO MEDIANTE ELEMENTOS PASIVOS COMO ALTERNATIVA PARA ENERGIZACIÓN DE EQUIPOS*, realizado por Bruno Fabricio Masabanda Pinza, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., febrero de 2021



.....

Rogelio Alfredo Orizondo Martínez

C.C.: 1757424195

## **DEDICATORIA**

Con mucho amor a mis padres Luis Alfonso Masabanda Alemán y Nancy Susana Pinza Tipán, de igual manera a mis queridos hermanos Diego, Christian, Jhony y a mi compañera de aventuras Joselyn, las personas más importantes en mi vida y por quienes he logrado conseguir esta nueva meta, ya que con sus consejos, ánimos e infinito amor me han ayudado a no desvanecer en este largo camino que está por finalizar.

Bruno Fabricio Masabanda Pinza

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por darme la fortaleza, y sabiduría para poder superar los obstáculos que se atravesaron en este largo camino, también por darme a los mejores padres del mundo quienes son ejemplo de perseverancia, responsabilidad, educación y amor, de ellos he aprendido todo lo que hoy me forma como persona.

Agradezco a mi querida Universidad Politécnica Salesiana por ser mi segundo hogar, a mis queridos docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica por compartir sus conocimientos en mi formación profesional, pero sobre todo un especial agradecimiento al Msc. Rogelio Orizondo quien fue mi guía para el desarrollo de este proyecto y me brindó su apoyo y conocimientos profesionales para cumplir con este objetivo, además por ser una gran persona siempre dispuesto a ayudar y por ser una inspiración profesional para mi persona.

Bruno Fabricio Masabanda Pinza

## ÍNDICE

RESUMEN .....	xi
ABSTRACT .....	xii
CAPÍTULO I .....	A
INTRODUCCIÓN .....	A
1.1 Antecedentes .....	B
1.2 Importancia y Alcances .....	C
1.3 Delimitación del Problema .....	D
1.4 Objetivo general .....	5
1.5 Objetivos específicos .....	5
CAPÍTULO II .....	6
MARCO TEÓRICO .....	6
2.1 Resistencia, bobina y condensador y sus parámetros R, L y C .....	6
2.2 Circuitos R, L y C con excitación sinusoidal .....	6
2.3 Resistencia y la Corriente Alterna sinusoidal .....	7
2.4 Inductancia y la Corriente Alterna sinusoidal .....	9
2.5 Reactancia inductiva .....	11
2.6 Capacitancia y Corriente Alterna sinusoidal .....	12
CAPÍTULO III .....	15
DISEÑO DE CONVERSIÓN MONOFÁSICO TRIFÁSICO .....	15
3.1 Circuito de conversión monofásico a trifásico .....	15
3.2 Fórmulas para el cálculo de las componentes del circuito conversor .....	16
3.3 Fórmulas de cálculo para la componente en la fase «A». .....	17
3.4 Fórmulas de cálculo de componentes en la fase «C» .....	18
3.5 Diagrama fasorial .....	18
CAPÍTULO IV .....	20

ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	20
4.1    Cálculo de las componentes $L_a$ y $C_c$ para el caso estudio .....	20
4.2    Simulación del circuito en Simulink .....	20
4.3    Análisis del circuito de prueba con carga resistiva nominal .....	22
4.3.1    Análisis del circuito de prueba con carga resistiva inferior a la nominal .	28
4.3.2    Análisis del circuito de prueba con carga resistiva superior a la nominal	32
4.4    Análisis del circuito de prueba con carga en serie resistencia e inductancia	36
4.5    Análisis del circuito de prueba con carga en serie resistencia y capacitancia	44
4.6    Análisis de los casos de estudio sobre el sistema de conversión. ....	51
CONCLUSIONES .....	54
RECOMENDACIONES .....	56
BIBLIOGRAFÍA .....	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Situación del desfase entre voltaje y corriente en un circuito resistivo: a) Circuito en cualquier fase del sistema trifásico. b) Si el voltaje de la fuente es una onda seno, $v_R$ , $i_R$ proporcional a $v_R$ y también es una onda seno. ....	8
Figura 2 Fasores en fase para un circuito resistivo puro. ....	8
Figura 3 Voltaje $V_L$ proporcional a la tasa de cambio de la corriente $i_L$ . ....	9
Figura 4 Relaciones para un circuito puramente inductivo: a) para la inductancia la corriente atrasa al voltaje en $90^\circ$ . b) los fasores muestran un desfase de $90^\circ$ . ....	10
Figura 5 Fasores y forma de onda al tomar $V_L$ como referencia.....	11
Figura 6 Relación diferencial entre la corriente en un capacitor y su voltaje, $v_C$ .....	13
Figura 7 Ondas y fasores para un circuito puramente capacitivo. a) Formas de onda con $v_C$ como referencia. b) Fasores circuito capacitivo con $v_C$ en $0^\circ$ . ....	13
Figura 8 Fasores de circuito capacitivo cuando $V_C$ se encuentra en $-30^\circ$ . ....	14
Figura 9, Diseño circuital para la conversión del sistema monofásico al trifásico. Se destaca en trazo segmentado de color azul.[30] .....	15
Figura 10 Circuito para determinar la componente en la fase «A». ....	17
Figura 11 Circuito para determinar componentes en ramificación de fase «C». ....	18
Figura 12 Diagrama fasorial del convertidor de sistemas monofásico a trifásico.....	19
Figura 13 Implementación virtual del circuito de conversión de un sistema monofásico a trifásico con carga resistiva en Simulink.....	22
Figura 14 Voltajes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistiva.....	23
Figura 15 Corrientes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistiva.....	24
Figura 16 Formas de onda de voltaje y corriente de fase A en circuito con carga puramente resistiva.....	25
Figura 17 Forma de onda de voltaje y corriente de fase B en circuito con carga puramente resistiva.....	26



Figura 18 Forma de onda de voltaje y corriente de fase C en circuito con carga puramente resistiva.....	27
Figura 19 Forma de onda de la corriente de neutro en el circuito con carga puramente resistiva.....	28
Figura 20 Voltajes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistiva de 100 $\Omega$ .....	29
Figura 21 Corrientes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistiva 100 $\Omega$ .....	30
Figura 22 Forma de onda de la corriente de neutro en el circuito con carga puramente resistiva de 100 $\Omega$ .....	31
Figura 23 Voltajes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistiva 150 $\Omega$ .....	32
Figura 24 Corrientes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistiva 150 $\Omega$ .....	33
Figura 25 Forma de onda de la corriente de neutro en el circuito con carga puramente resistiva de 150 $\Omega$ .....	34
Figura 26 Implementación virtual del circuito de conversión de un sistema monofásico a trifásico con carga resistivo-inductiva en Simulink. ....	36
Figura 27 Voltajes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistivo-inductiva. ....	37
Figura 28 Triángulo de impedancias para el cálculo de reactancia inductiva. ....	37
Figura 29 Corrientes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistivo-inductivo. ....	39
Figura 30 Forma de onda de voltaje y corriente en fase A en circuito con carga resistivo-inductivo. ....	40
Figura 31 Forma de onda de voltaje y corriente de fase B en circuito con resistivo-inductivo. ....	41
Figura 32 Forma de onda de voltaje y corriente de fase C en circuito con carga resistivo-inductiva. ....	42

Figura 33 Forma de onda de corriente de neutro en circuito con carga resistivo-inductivo. .....	43
Figura 34 Implementación virtual del circuito de conversión de un sistema monofásico a trifásico con carga resistivo-capacitivo en Simulink. ....	44
Figura 35 Voltajes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistivo-capacitiva. ....	45
Figura 36 Triángulo de impedancias para el cálculo de reactancia capacitiva. ....	45
Figura 37 Corrientes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistiva-capacitiva. ....	47
Figura 38 Forma de onda de voltaje y corriente de fase A en circuito con carga resistivo-capacitiva. ....	48
Figura 39 Forma de onda de voltaje y corriente de fase B en circuito con carga resistivo-capacitiva. ....	49
Figura 40 Forma de onda de voltaje y corriente de fase C en circuito con carga resistivo-capacitiva. ....	50
Figura 41 Forma de onda de corriente de neutro en circuito con carga resistivo-inductiva. .....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores establecidos para los cálculos. ....	20
Tabla 2 Cálculo de la inductancia $L_a$ . ....	20
Tabla 3 Cálculo de la capacitancia $C_c$ . ....	20
Tabla 4 Parámetros de simulación. ....	21
Tabla 5 Cálculo del valor del ángulo de carga por medio del factor de potencia. ....	38
Tabla 6 Cálculo del valor de reactancia inductiva. ....	38
Tabla 7 Cálculo del valor del inductor. ....	38
Tabla 8 Cálculo del valor del ángulo por medio del factor de potencia en adelante. ....	46
Tabla 9 Cálculo del valor de reactancia capacitiva. ....	46
Tabla 10 Cálculo del valor del capacitor. ....	46

## **RESUMEN**

El trabajo tiene la finalidad de implementar en forma virtual el esquema de conexión de un convertidor eléctrico para proveer de un sistema trifásico a una carga, a partir de un sistema eléctrico monofásico. Esto, como alternativa de energización para zonas donde se carezca de redes de electrificación trifásica. Para proponer un circuito capaz de realizar la conversión de dichos sistemas, se propone el uso de capacitores, inductores y transformadores (todos elementos pasivos), los cuales permiten realizar la conversión requerida.

Con la ayuda del programa Matlab específicamente con su herramienta Simulink se realizará una serie de simulaciones con diferentes tipos de carga con la finalidad de estudiar su comportamiento ante diferentes situaciones de trabajo del sistema de conversión monofásico trifásico.

Con los resultados que se obtiene se procede a realizar un análisis profundo de cada caso de estudio verificando la capacidad de funcionamiento continuo del sistema de conversión, a su vez permitiendo establecer valores de elementos adecuados para una correcta operación de dicho sistema.

Con este trabajo se busca dar a las zonas de menos densidad poblacional (zonas rurales), una alternativa de energización para sus maquinarias, al mismo tiempo se genera una mayor producción y ahorro de mantenimientos de sus sistemas.

## **ABSTRACT**

The purpose of this work is to simulate a converter scheme to provide a three-phase voltage system from a single-phase electrical system. To accomplish this, different scenarios of loading have been carried out to understand its capabilities. This converter could be used to provide energy for areas where there is a lack of three-phase electrification networks. The circuit is made up of capacitors, inductors, and transformers, all passive elements.

With the help of the MATLAB software Simulink, a series of simulations with different types of load are carried out to study its behavior. These loads were nominal resistive load, non-nominal resistive loads, mixed resistive and inductive load with a lagging power factor of 0.8, and mixed resistive and capacitive load with a leading power factor of 0.8. Results show no matter which reactive loads are used, there is no possibility of balanced operation within the original configuration.

Same unbalancing results are obtained when attempting to feed non-nominal resistive loads. A balanced three-phase-system operation only is possible by serving a resistive nominal load tune in with the converters parameters.

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

El único tipo de energía eléctrica disponible en áreas de baja densidad debido a su consumo, comparado con zonas industriales, es la red eléctrica monofásica. Incluso las tecnologías más modernas como las microrredes alimentan cargas del tipo monofásicas o trifásicas desbalanceadas [1]. Sin embargo, algunas cargas sólo pueden operar de forma trifásica. Es el caso de algunas bombas de agua con fines de riego, se trata de motores de inducción trifásicos acoplados a bombas. En la literatura técnica se presentan varios estudios sobre conversión de sistemas monofásicos a trifásicos, pero presentan algunas desventajas: [2]-[5].

Existen alternativas como los inversores de clasificación reducida, los cuales tienen la ventaja de entregar una fracción de potencia de carga total directamente desde la fuente [6], inversores y convertidores a través de rectificadores monofásicos en paralelo con una rama compartida no controlada. Este método de conversión ayuda a mejorar la distorsión armónica presente en el sistema [7]-[10].

Otras alternativas son el uso de máquinas de inducción, convertidores rotativos o el uso de electrónica de potencia, la ocupación de convertidores rotativos es muy compleja y en muchos casos puede ser una solución relativamente ineficiente. Por otro lado, los convertidores que emplean la electrónica de potencia producen un voltaje equilibrado y permite su control tal como se demuestra en [11]-[17], pero su costo es relativamente alto.

Otra alternativa que también incluye la electrónica de potencia basa su operación en un enlace inductivo capaz de proporcionar el voltaje de salida trifásico deseado como se detalla en [3] y en [18]-[21]. También existen soluciones en sistemas de conversión por medio de convertidor matricial el cual básicamente se basa en la implementación de nueve interruptores bidireccionales que conectan directamente la carga trifásica a una de las líneas de alimentación [22].

Un convertidor de sistemas monofásico trifásico debe generar una potencia trifásica equilibrada, que las tres fases tengan voltajes con la misma amplitud y ángulos de desfase entre las formas de onda de  $120^\circ$  a secuencia positiva [23]. Si no se trabaja de la manera antes planteada puede presentarse complicaciones en la operación de las cargas [24]-[25].

En este trabajo se propuso realizar una búsqueda de un diseño circuital e implementarla de forma virtual destacando que en él no se empleara la electrónica de potencia, sino tan solo elementos pasivos prescindiendo en lo posible de los motores eléctricos. Una vez seleccionado este circuito, quedó claro que no había información suficiente sobre las características paramétricas del transformador.

Tampoco resultaba claro si el sistema de conversión operaría bajo una frecuencia de 60 ciclos.

Las simulaciones efectuadas en Simulink [26]-[27], buscan reproducir los resultados obtenidos además de precisar las características del transformador monofásico y de verificar la incapacidad del circuito conversor en operar de forma balanceada frente a cargas cuyo factor de potencia deje de ser unitario, bien ante cargas con componente capacitivo como ante cargas con componente inductivo.

## **DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.1 Antecedentes**

Como una alternativa de energización para lugares donde no existan redes trifásicas de energía por ejemplo en zonas rurales o zonas de baja densidad, se ha consultado en la bibliografía un diseño que permita proveer un sistema de alimentación trifásico balanceado a partir de un sistema de alimentación monofásico. Este sistema se puede emplear para alimentar cargas trifásicas como los motores eléctricos de mediana potencia.

Las simulaciones realizadas en Simulink permiten verificar los niveles de tensión y corriente que el sistema de conversión monofásico trifásico puede proveer al momento de su operación, verificando así su estabilidad, ante diferentes condiciones de carga.

Adicionalmente se presenta una breve descripción de los diferentes elementos asociados al sistema de conversión: capacitores, inductores, transformadores para luego describir el corazón del sistema de conversión. Todas las simulaciones muestran que el comportamiento del sistema de conversión es estable solo con carga resistiva cuyo valor este sintonizado con los parámetros del convertidor. Si se carga el sistema de conversión con factores de potencia en adelanto o en atraso se obtiene un sistema de tensiones desbalanceado, al igual que cuando se intentar cargar el sistema de conversión con una resistencia diferente al valor de sintonización de los parámetros del convertidor.

## **1.2 Importancia y Alcances**

El problema de la conversión de una red monofásica a un sistema de voltajes trifásico balanceado sigue siendo uno de los problemas más actuales en el mundo de la ingeniería eléctrica hoy en día. Por ejemplo, una búsqueda en **Google Academics** para la frase «*single phase conversion to three phase*» arroja más de 5 millones de resultados al momento de redactar este artículo. Por otra parte, una búsqueda similar en **Xplore de IEEE** muestra más de 2000 artículos entre conferencias, revistas y cursos.

Toda clase de soluciones se plantean desde la academia y desde las empresas, que van desde la electrónica de potencia hasta los motores de inducción, algunas muy ingeniosas. Una revisión del estado del arte publicada en el año 2012, que compara diferentes propuestas circuitales usando electrónica de potencia, tiene más de 100 artículos revisados y clasifica hasta 30 configuraciones diferentes en 8 diferentes estrategias generales.



Si bien un objetivo de este trabajo es lograr reproducir los resultados de una investigación ya publicada, se buscaba también identificar los parámetros del transformador monofásico pues en la investigación original nunca se los publicó, verificar su operación en polaridad inversa, así como checar la imposibilidad de conectar carga mixta, bien resistivo-inductiva, así como resistivo-capacitiva. Se publican los resultados de la operación del circuito convertidor alimentando cargas con un factor de potencia de 0,8 en atraso, así como de 0,8 en adelanto, donde la teoría predice un desbalance en el voltaje trifásico. Dado que los parámetros de este circuito son dependientes de la frecuencia de la red, en este trabajo se recalculan los valores de los parámetros para 60 ciclos.

### **1.3 Delimitación del Problema**

El presente trabajo consiste en verificar la operación de una topología circuital capaz de convertir un sistema de alimentación monofásico en un sistema de alimentación trifásico con la presencia de voltajes y corrientes totalmente equilibradas (balanceadas) a secuencia positiva.

Las simulaciones fueron realizadas utilizando Simulink, y se incluyeron algunas pruebas pertinentes: dado que la bibliografía reporta que el sistema es estable solo con carga trifásica resistiva balanceada, se verificó la operación estable, así como la inestable del circuito ante cargas tipo RC y RL con factor de potencia 0.8 en adelanto y atraso respectivamente.

Otra característica específica del circuito es que no tiene electrónica de potencia incorporada. Se trata de un circuito implementado virtualmente mediante una sintonización de elementos pasivos para una carga determinada (carga orientada). Las formas de ondas obtenidas carecen de armónicos dado que no hay semiconductores

operando en el circuito. Por tanto, tampoco es necesario el uso de ningún tipo de filtros, pasivos o activos.

Este tipo de convertidores pueden ser implementados en áreas rurales donde no llega la red de electrificación trifásica, dado que una red de alimentación monofásica limita el uso de equipos tecnológicos que operan de forma trifásica, tales como las motobombas. De implementarse, esto significaría un aporte a la comunidad. Por otra parte, una implementación real puede reducir el consumo de combustibles fósiles, dado que con mucha frecuencia se utiliza generadores a diésel para alimentar cargas trifásicas en aquellas poblaciones que carecen de red trifásica.

#### **1.4 Objetivo general**

Implementar de forma virtual el esquema de conexión de un convertidor estático para proveer de un sistema trifásico a una carga, a partir de otro sistema eléctrico monofásico.

#### **1.5 Objetivos específicos**

- 1) Establecer un modelo detallado de un sistema de conversión monofásica a trifásica usando solo elementos pasivos.
- 2) Simular, usando el programa Simulink, un modelo de este sistema de conversión con cargas resistiva.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Resistencia, bobina y condensador y sus parámetros R, L y C**

Esta exposición teórica tiene como propósito comprender los fundamentos teóricos sobre los cuales se basa el circuito conversor monofásico a trifásico. Se trata de una teoría bastante simple y muy bien conocida en electrotecnia e ingeniería eléctrica.

Los elementos pasivos tales como las resistencias, las bobinas y los condensadores tienen asociados los parámetros de resistencia, inductancia y capacitancia, usualmente categorizados como componentes o parámetros R, L y C.

#### **2.2 Circuitos R, L y C con excitación sinusoidal**

En el conductor, los portadores de la carga son electrones libres que se pueden mover gracias al campo eléctrico o voltaje de una fuente. Cuando los electrones se desplazan a través del conductor colisionan con los átomos, así como con los otros electrones dentro del material conductor. Los electrones ceden parte de su energía en forma de calor. Las colisiones se consideran la oposición al desplazamiento de los electrones. Esta oposición al movimiento es llamada resistencia. Los componentes de circuito denominados comercialmente resistores, están específicamente diseñados para oponerse al movimiento de los electrones y por tanto se llaman resistencia. Esta oposición al movimiento implica una entrega de calor por unidad de tiempo, al que llamamos potencia. Esta potencia se entrega al ambiente inmediatamente circundante al del resistor. Este efecto lo llamamos Joule. Aunque el resistor es el componente más simple de cualquier circuito, su efecto es muy importante en la determinación de la operación de cualquier circuito. Por tanto, se afirma que la resistencia tiene la función de oponerse a la corriente.

Cuando una corriente fluye a través de un conductor se crea un campo magnético. Para describir ese efecto se asigna un parámetro de circuito llamado inductancia. Esta tiene su origen en el campo magnético creado por la corriente y el efecto que ejerce es hacer más

lento el crecimiento y el decrecimiento de la corriente es decir oponerse a su cambio. Un elemento de un circuito que posee inductancia se llama inductor. Un inductor es una simple bobina de alambre. Los inductores sólo tienen inductancia, pero ya que están hechos de un conductor también una resistencia, aunque muy pequeña, usualmente insignificante y se considera a los inductores como ideales. Esto significa que solo tiene la propiedad de la inductancia, sin ninguna resistencia. Por tanto, los inductores se oponen a los cambios que se presentan en la corriente. Los capacitores se oponen a cambios en el voltaje.

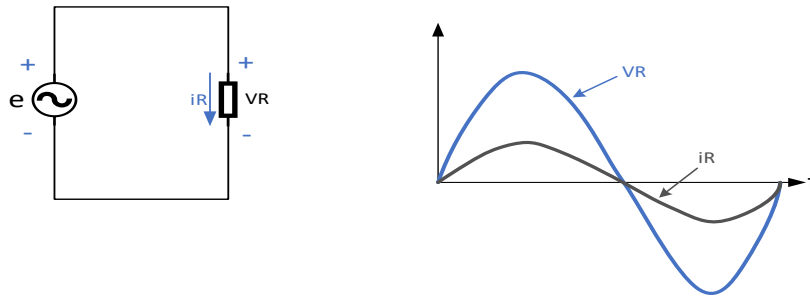
El resultado de que estos elementos pasivos trabajen de manera diferente es que existen relación entre voltaje-corriente distintas.

Los circuitos que se componen de elementos pasivos como resistores, capacitores e inductores y se conectan a una fuente sinusoidal, sus salidas en corrientes y voltajes también serán sinusoidales. Las ondas producidas por estos circuitos tendrán la misma frecuencia que proporciona la fuente y se diferenciarán en sus ángulos de fase y magnitudes respectivas.

La excepción a este comportamiento lineal es la no linealidad presente en los transformadores, pues su circuito magnético implica un comportamiento no lineal de la inductancia respecto del voltaje. Este efecto es esencialmente despreciable en el caso de los transformadores bajo carga [28].

### **2.3 Resistencia y la Corriente Alterna sinusoidal**

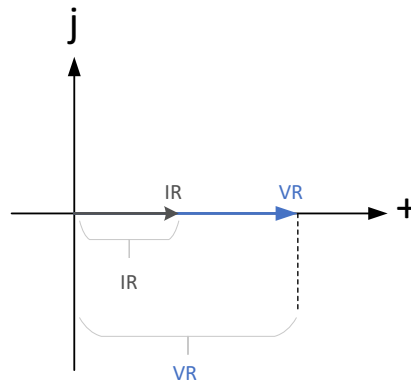
En un circuito puramente resistivo, con una resistencia lineal, se aplica la ley de Ohm, que predice un comportamiento directamente proporcional de la corriente respecto al voltaje. El cambio de dirección en la corriente es producido cuando el voltaje cambia su polaridad tal como se explica en la Figura 1. En este caso se afirma que la corriente y voltaje están en fase.



**Figura 1** Situación del desfase entre voltaje y corriente en un circuito resistivo: a) Circuito en cualquier fase del sistema trifásico. b) Si el voltaje de la fuente es una onda seno,  $v_R$ ,  $i_R$  proporcional a  $v_R$  y también es una onda seno.

Elaborado por: Bruno Masabanda

También sus fasores coinciden como se muestra en la Figura 1.



**Figura 2** Fasores en fase para un circuito resistivo puro.

Elaborado por: Bruno Masabanda

La relación que se establece en la Figura 1 se explica matemáticamente de la siguiente manera:

$$i_R(t) = \frac{V_R}{R} = \frac{V_m \sen \omega t}{R} = \frac{V_m}{R} \sen \omega t = I_m \sen \omega t \quad (1)$$

$i_R(t)$  = Corriente de la resistencia.

$V_R$  = Voltaje de la resistencia.

Donde:

$R$  = Valor de la resistencia.

$\omega$  = Frecuencia angular.

$t$  = Variable de tiempo.

$V_m$  = Voltaje pico.

$I_m$  = Corriente pico.

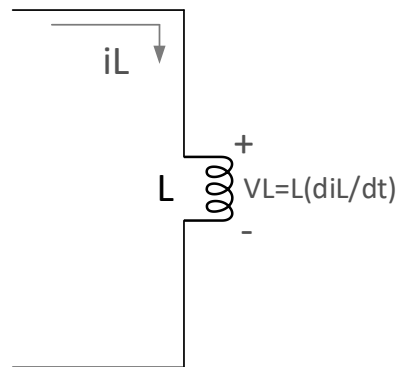
Donde: 
$$I_m = \frac{V_m}{R} \quad (2)$$

Al despejar: 
$$V_m = I_m R \quad (3)$$

También es evidente que, si cambia la referencia angular, se conservan estas relaciones:  $V_R = V_m \text{sen}(\omega t + \theta)$ , entonces  $i_R = I_m \text{sen}(\omega t + \theta)$ .

## 2.4 Inductancia y la Corriente Alterna sinusoidal

En un inductor ideal, el voltaje  $V_L$  es proporcional a la tasa de cambio que existe en la corriente. Esta es la razón principal por la cual ambas no se encuentran en fase como ocurre en un circuito resistivo.



**Figura 3** Voltaje  $V_L$  proporcional a la tasa de cambio de la corriente  $i_L$ .

Elaborado por: Bruno Masabanda

Siguiendo la Figura 3,  $V_L = L \frac{di_L}{dt}$ . Para una forma de onda senoidal de corriente, al derivarse se obtiene:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = L \frac{d}{dt} (I_m \text{sen } \omega t) = \omega L I_m \cos \omega t = V_m \cos \omega t \quad (4)$$

Donde:  $V_L$  = Voltaje del inductor.

$\omega$  = Frecuencia angular.

$L$  = Valor del inductor.

$t$  = Variable de tiempo.

$V_m$  = Voltaje pico.

$I_m$  = Corriente pico.

Si se utiliza trigonometría con la identidad  $\cos \omega t = \text{sen}(\omega t + 90^\circ)$ , se puede establecer como:

$$V_L = V_m \text{sen}(\omega t + 90^\circ) \quad (5)$$

$V_L$  = Voltaje del inductor.

Donde:  $\omega$  = Frecuencia angular.

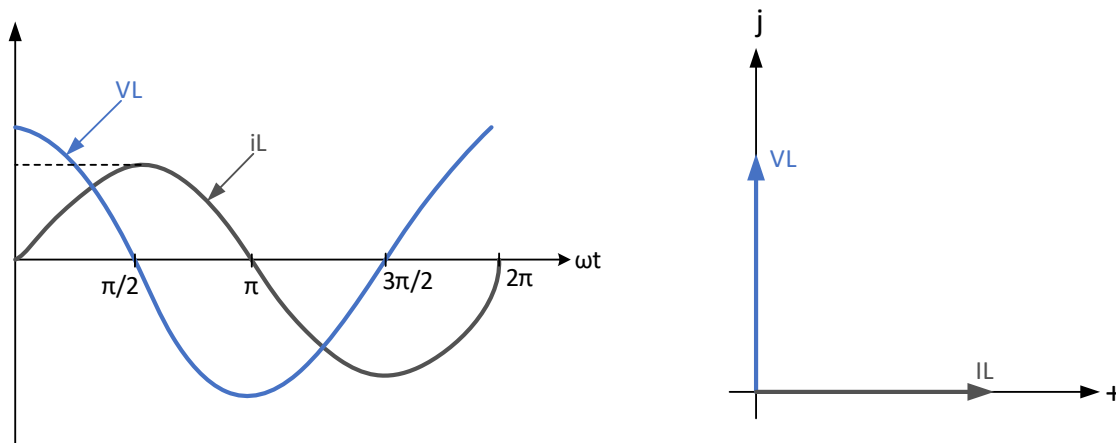
$t$  = Variable de tiempo.

$V_m$  = Voltaje pico.

Donde:  $V_m = \omega L I_m$  (6)

Se trata de la fórmula de Ohm generalizada. Las ondas sinusoidales de voltaje y corriente producidas y sus fasores se detallan en la Figura 4.

En un circuito puramente inductivo se establece un atraso de  $90^\circ$  de la corriente respecto al voltaje.

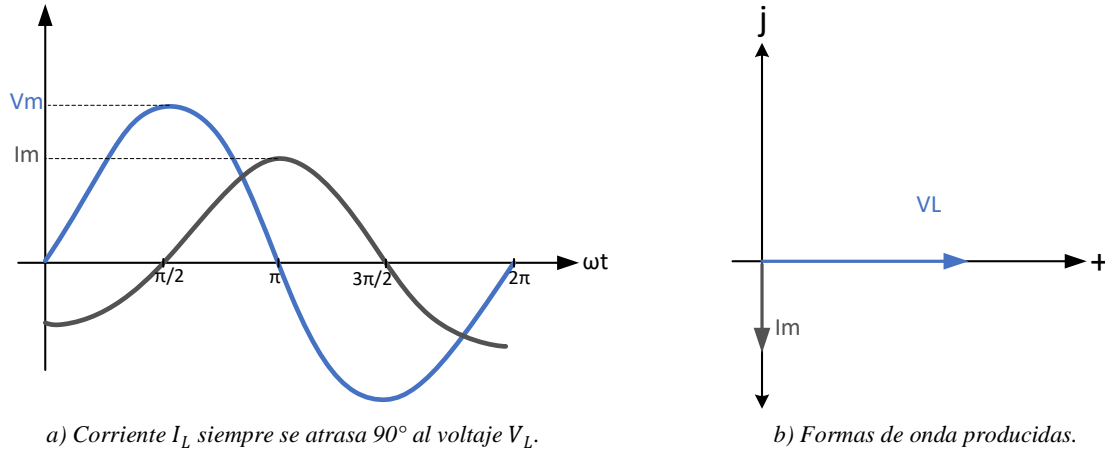


**Figura 4** Relaciones para un circuito puramente inductivo: a) para la inductancia la corriente atrasa al voltaje en  $90^\circ$ . b) los fasores muestran un desfase de  $90^\circ$ .

Elaborado por: Bruno Masabanda

Sin importar la referencia que se tenga en el circuito, siempre existe un atraso de  $90^\circ$  de la corriente respecto al voltaje tal como se evidencia en el diagrama fasorial de la

Figura 4. Si en el diagrama fasorial se especifica que  $V_L$  se encuentra en  $0^\circ$  entonces la corriente  $I_L$  se ubica en  $-90^\circ$  respectivamente. Por lo tanto, si el voltaje  $V_L$  es una forma de onda seno, entonces la corriente  $i_L = -I_m \cos \omega t$ .  $I_L$  se puede expresar como  $I_L(t) = I_m \text{sen}(\omega t - 90^\circ)$ .



**Figura 5** Fasores y forma de onda al tomar  $V_L$  como referencia.

Elaborado por: Bruno Masabanda

Entonces si se conoce  $V_L$ , se sabe que la corriente  $I_L$  debe estar en atraso por  $90^\circ$ , y si se conoce  $I_L$  se sabe que  $V_L$  debe estar en adelanto por  $90^\circ$  [28].

## 2.5 Reactancia inductiva

En la ecuación (6) se establece la relación entre  $V_m$  e  $I_m$ .

$$\frac{V_m}{I_m} = \omega L \quad (7)$$

La relación antes descrita se define como reactancia inductiva y se denota por el símbolo  $X_L$ . La relación entre voltios y amperios es ohmios, entonces la reactancia tiene unidades de ohmios. Esta relación es válida desde el punto de vista de los módulos de los fasores.[29]

$$X_L = \frac{V_m}{I_m} (\Omega) \quad (8)$$

Donde:

$X_L$  = Inductancia.

$V_m$  = Voltaje pico.



$I_m$  = Corriente pico.

También queda claro de la ecuación (6) y ecuación (7) que:

$$X_L = \omega L(\Omega) \quad (9)$$

$X_L$  = Inductancia.

$\omega$  = Frecuencia angular.

Donde:

$L$  = Valor del inductor.

Donde  $\omega$  está en radianes por segundo y  $L$  en henrios.  $X_L$  representa la oposición a la corriente que tiene la inductancia para el caso de corriente sinusoidal.

También las siguientes relaciones son válidas:

$$I_m = \frac{V_m}{X_L} \quad (10)$$

y

$$V_m = I_m X_L \quad (11)$$

## 2.6 Capacitancia y Corriente Alterna sinusoidal

En el caso de la capacitancia, la corriente es proporcional a la tasa de cambio del voltaje,

es decir,  $i_c = C \frac{dv_c}{dt}$ . Entonces si  $v_c(t)$  es una forma de onda seno, se obtiene por medio

de sustitución:

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} = C \frac{d}{dt}(V_m \sin \omega t) = \omega C V_m \cos \omega t = I_m \cos \omega t \quad (12)$$

$i_c$  = Corriente del capacitor.

$\omega$  = Frecuencia angular.

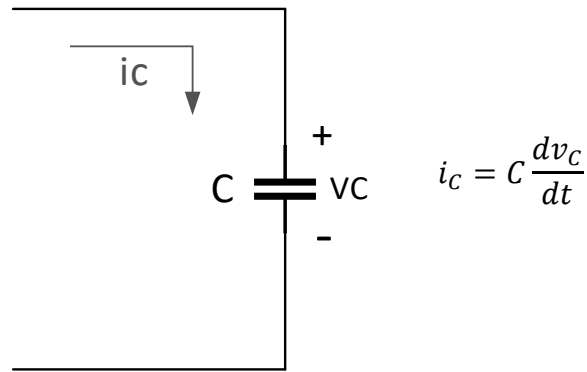
$C$  = Valor del capacitor.

Donde:

$t$  = Variable de tiempo.

$V_m$  = Voltaje pico.

$I_m$  = Corriente pico.



**Figura 6** Relación diferencial entre la corriente en un capacitor y su voltaje,  $v_C$

Elaborado por: Bruno Masabanda

Mediante el uso de identidades trigonométricas, es evidente que:

$$i_C(t) = I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (13)$$

$i_C$  = Corriente del capacitor.

$I_m$  = Corriente pico.

Donde:

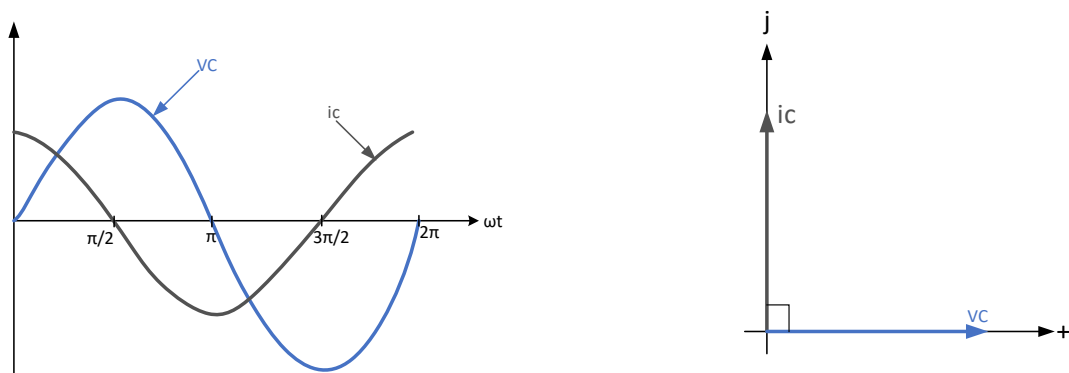
$\omega$  = Frecuencia angular.

$t$  = Variable de tiempo.

Donde:

$$I_m = \omega C V_m \quad (14)$$

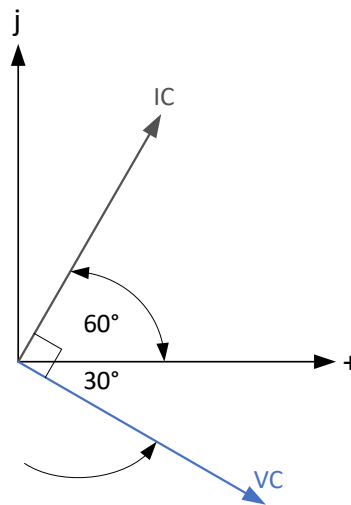
Las formas de onda que se producen en un circuito capacitivo y sus respectivos fasores se muestran en la Figura 7. En la figura se establece que para un circuito capacitivo puro la corriente está adelantada en  $90^\circ$  respecto del voltaje.



**Figura 7** Ondas y fasores para un circuito puramente capacitivo. a) Formas de onda con  $v_C$  como referencia. b) Fasores circuito capacitivo con  $v_C$  en  $0^\circ$ .

Elaborado por: Bruno Masabanda

En un circuito puramente capacitivo tampoco importa la referencia que se tenga de la corriente, siempre estará en adelante por  $90^\circ$  respecto al voltaje, por ejemplo, si  $v_C$  está en  $-30^\circ$ , entonces la corriente  $I_C$  se debe encontrar en  $60^\circ$  [28].



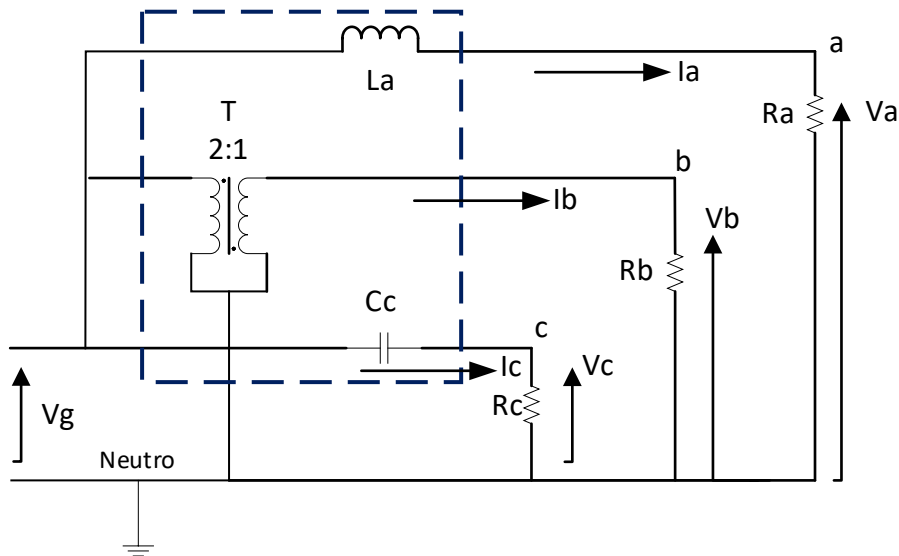
**Figura 8** Fasores de circuito capacitivo cuando  $V_C$  se encuentra en  $-30^\circ$ .

Elaborado por: Bruno Masabanda

## CAPÍTULO III

### DISEÑO DE CONVERSIÓN MONOFÁSICO TRIFÁSICO

#### 3.1 Circuito de conversión monofásico a trifásico



**Figura 9** Diseño circuital para la conversión del sistema monofásico al trifásico. Se destaca en trazo segmentado de color azul [30].

Elaborado por: Bruno Masabanda

El circuito que permite convertir un sistema de alimentación monofásico a un sistema trifásico se muestra en la Figura 9. La fuente de alimentación monofásica viene representada por el voltaje  $V_g$ . La carga está representada por las tres resistencias iguales  $R_a$ ,  $R_b$  y  $R_c$ . Los voltajes del sistema trifásico son  $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$ .

La conexión de un inductor de inductancia  $L_a$  en serie con la resistencia de carga de la fase «A» produce una corriente en atraso. Por tanto, también hay un atraso en el voltaje  $V_a$  sobre la resistencia  $R_a$  con respecto al voltaje del generador  $V_g$ .

La conexión de un capacitor de capacitancia  $C_c$  en serie con la resistencia de la carga de la fase «C» produce una corriente en adelanto. Por tanto, también hay un adelanto en el voltaje  $V_c$  sobre la resistencia  $R_c$  con respecto al voltaje del generador  $V_g$ .

El diseño circuital propuesto para la conversión está orientado según la carga. Esto significa que las formas de onda del voltaje introducidos por el circuito conversor dependen de valor de la carga a alimentar. Se calcula la capacitancia y la inductancia con

la finalidad de que los ángulos de los voltajes de salida en las fases «A» y «C» en el lado de la carga estén a  $-60^\circ$  y  $+60^\circ$  respecto del voltaje en el generador. Esto significa que los voltajes en las fases «A» y «C» en el lado de la carga estén a  $-120^\circ$  y  $+120^\circ$  respecto del voltaje en la fase «B», como se indica en la Figura 12.

Así pues, el ángulo de voltaje de salida en la carga  $R_a$  se convierte en  $\Delta\varphi_a = -60^\circ$ , y el ángulo de salida de carga en la resistencia  $R_c$  se convierte en  $\Delta\varphi_c = +60^\circ$ , siempre respecto al voltaje del generador.

La conexión del transformador monofásico de polaridad inversa permite invertir el voltaje del generador en  $180^\circ$ , provocando que el ángulo de fase del voltaje en la carga  $R_b$  sea  $180^\circ$  respecto de la generación.

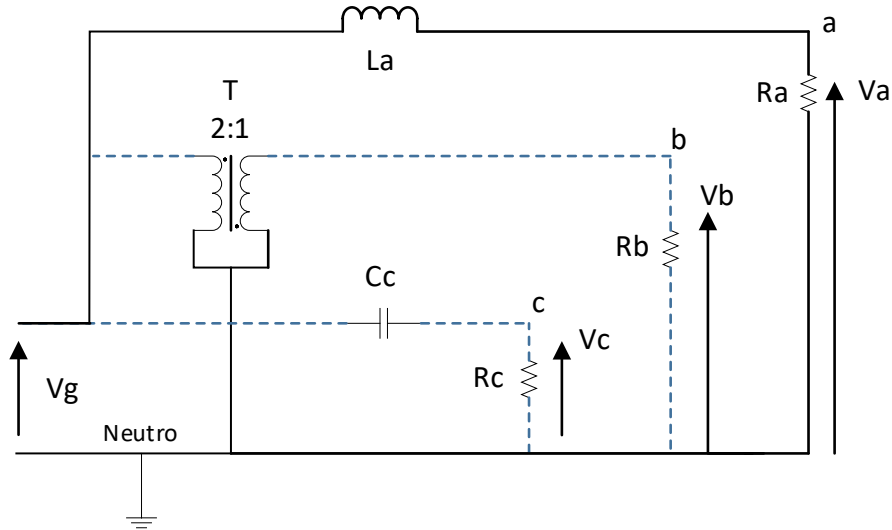
Como resultado final, en la salida del sistema de conversión, los voltajes se desfasan  $120^\circ$  entre sí, donde los ángulos entre las fases «A» y «B» es de  $120^\circ$  con la fase «B» en atraso, y el ángulo entre las fases «A» y «C» es también de  $120^\circ$  con la fase «C» en adelanto. De esta manera se genera una red trifásica equilibrada tanto en magnitud como angularmente y a secuencia positiva. En la siguiente sección se detallan los cálculos de los parámetros del circuito.

### **3.2 Fórmulas para el cálculo de las componentes del circuito conversor**

En esta sección se detalla cómo calcular las componentes  $L_a$  y  $C_c$ . Al ser un sistema trifásico, cada una de las fases es independiente y estas se conectan en paralelo al generador; esto permite realizar cálculos por separado de cada fase.

Se considera que la carga trifásica es resistiva y balanceada de tal forma que  $R_a = R_b = R_c = R$ .

### 3.3 Fórmulas de cálculo para la componente en la fase «A».



**Figura 10** Circuito para determinar la componente en la fase «A».

Elaborado por: Bruno Masabanda

$$\Delta\varphi_{Ia} = -\arctg\left(\frac{\omega L_a}{R_a}\right) = -60^\circ \quad (15)$$

$\Delta\varphi_{Ia}$  = Diferencia angular añadida para la fase «A», entre el fasor del voltaje del generador,  $V_g$ , y  $V_a$ .

Donde:

$\omega$  = Frecuencia angular.

$L_a$  = Valor del inductor.

$R_a$  = Valor de resistencia.

$$L_a = \frac{R_a}{\omega} \operatorname{tg} 60^\circ \quad (16)$$

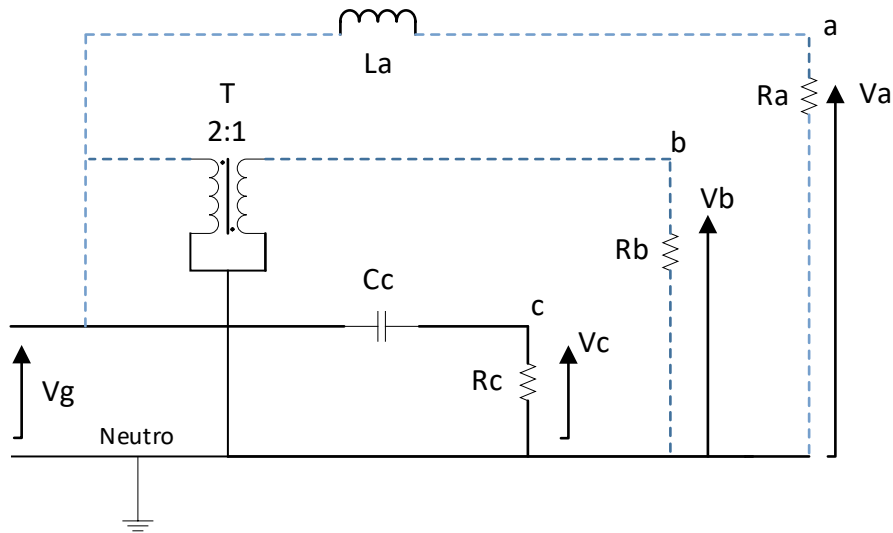
$$V_a = V_g \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L_a}{R_a}\right)^2}} = V_g \frac{1}{\sqrt{1 + (\operatorname{tg}(60^\circ))^2}} = \frac{V_g}{2} \quad (17)$$

Donde:

$V_a$  = Voltaje sobre la resistencia  $R_a$ .

$V_g$  = Voltaje del generador.

### 3.4 Fórmulas de cálculo de componentes en la fase «C»



**Figura 11** Circuito para determinar la componente en la fase «C».

Elaborado por: Bruno Masabanda

$$\Delta\phi_{Ic} = 90^\circ - \arctg(\omega C_c R_c) = 60^\circ \quad (18)$$

$\Delta\phi_{Ic}$  = Diferencia angular añadida para la fase «C», entre el fasor del voltaje del generador,  $V_g$ , y  $V_c$ .

Donde:

$\omega$  = Frecuencia angular.

$C_c$  = Valor del inductor.

$R_c$  = Valor de resistencia.

$$C_c = \frac{tg(30^\circ)}{\omega R_c} \quad (19)$$

$$V_c = V_g \frac{\omega C_c R_c}{\sqrt{1 + (\omega C_c R_c)^2}} = V_g \frac{tg(30^\circ)}{\sqrt{1 + (tg(30^\circ))^2}} = \frac{V_g}{2} \quad (20)$$

Donde:

$V_c$  = Voltaje sobre la resistencia  $R_c$ .

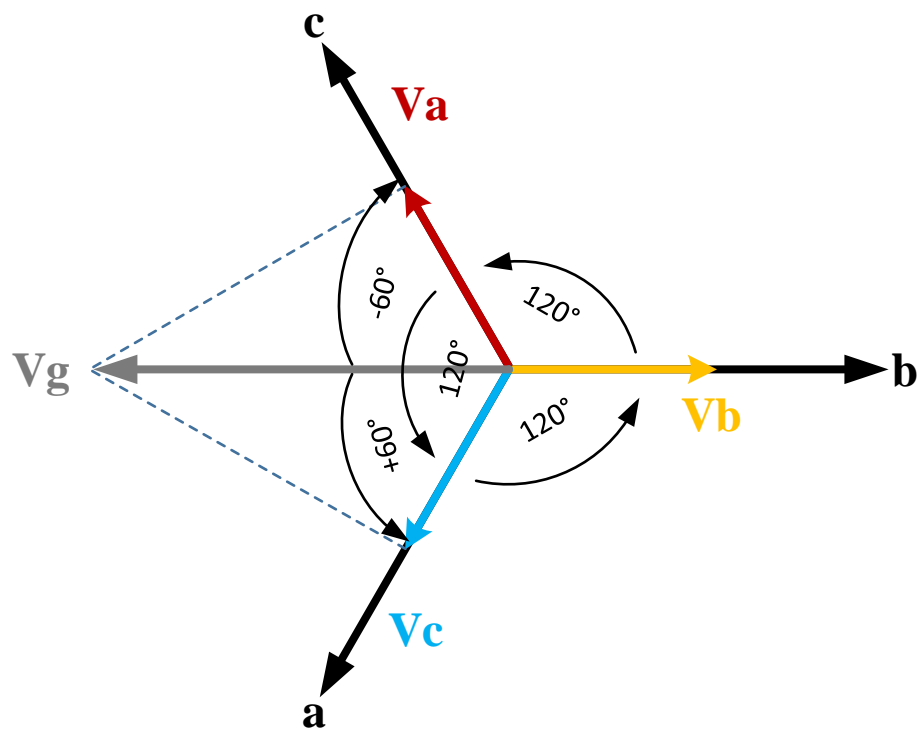
$V_g$  = Voltaje del generador.

### 3.5 Diagrama fasorial

Con los valores de los parámetros calculados en la sección precedente, ecuaciones (16) y (19), se asegura que los desfases angulares sean de  $120^\circ$  entre los fasores de la carga trifásica y las magnitudes de los voltajes  $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$  en el lado de la carga trifásica sean

iguales en magnitud, dado que  $R_a = R_b = R_c = R$ . Por ello se afirma que este circuito conversor está orientado según su carga (R), pues los valores de los parámetros  $L_a$  y  $C_c$  dependen de la resistencia de la carga.

El resultado obtenido a la salida de los voltajes en la carga, en sus fases «A» y «C»,  $V_a$  y  $V_c$ , es la mitad del voltaje de fase a neutro en el lado del generador. El transformador de polaridad inversa divide para dos el voltaje de salida en la fase «B». En la Figura 12 se explica con un diagrama fasorial el principio de funcionamiento del circuito.



**Figura 12** Diagrama fasorial del convertidor de sistemas monofásico a trifásico.

Elaborado por: Bruno Masabanda



## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 Cálculo de las componentes $L_a$ y $C_c$ para el caso estudio

Para la determinación de los parámetros  $L_a$  y  $C_c$  se utiliza los valores mostrados en la Tabla 1. Para determinar los parámetros se utilizan las ecuaciones (16) y (19). Los valores calculados se muestran en la Tabla 2 y la Tabla 3.

**Tabla 1** Valores establecidos para los cálculos.

Voltaje (RMS)	Carga Nominal	Frecuencia	$\omega$
231.223 V	133.46 $\Omega$	60 Hz	377 rad/s

**Tabla 2** Cálculo de la inductancia  $L_a$ .

Fórmula	Cálculo	Resultado
$L_a = \left(\frac{R}{\omega}\right) * \tan(60^\circ)$	$L_a = \left(\frac{133.46}{376.9911}\right) * \tan(60^\circ)$	$L_a = 0.6132 \text{ H}$

**Tabla 3** Cálculo de la capacitancia  $C_c$ .

Fórmula	Cálculo	Resultado
$C_c = \frac{\tan(30^\circ)}{\omega R}$	$C_c = \frac{\tan(30^\circ)}{(2\pi f) * 133.46}$	$C_c = 11.475 \times 10^{-6} \text{ F}$

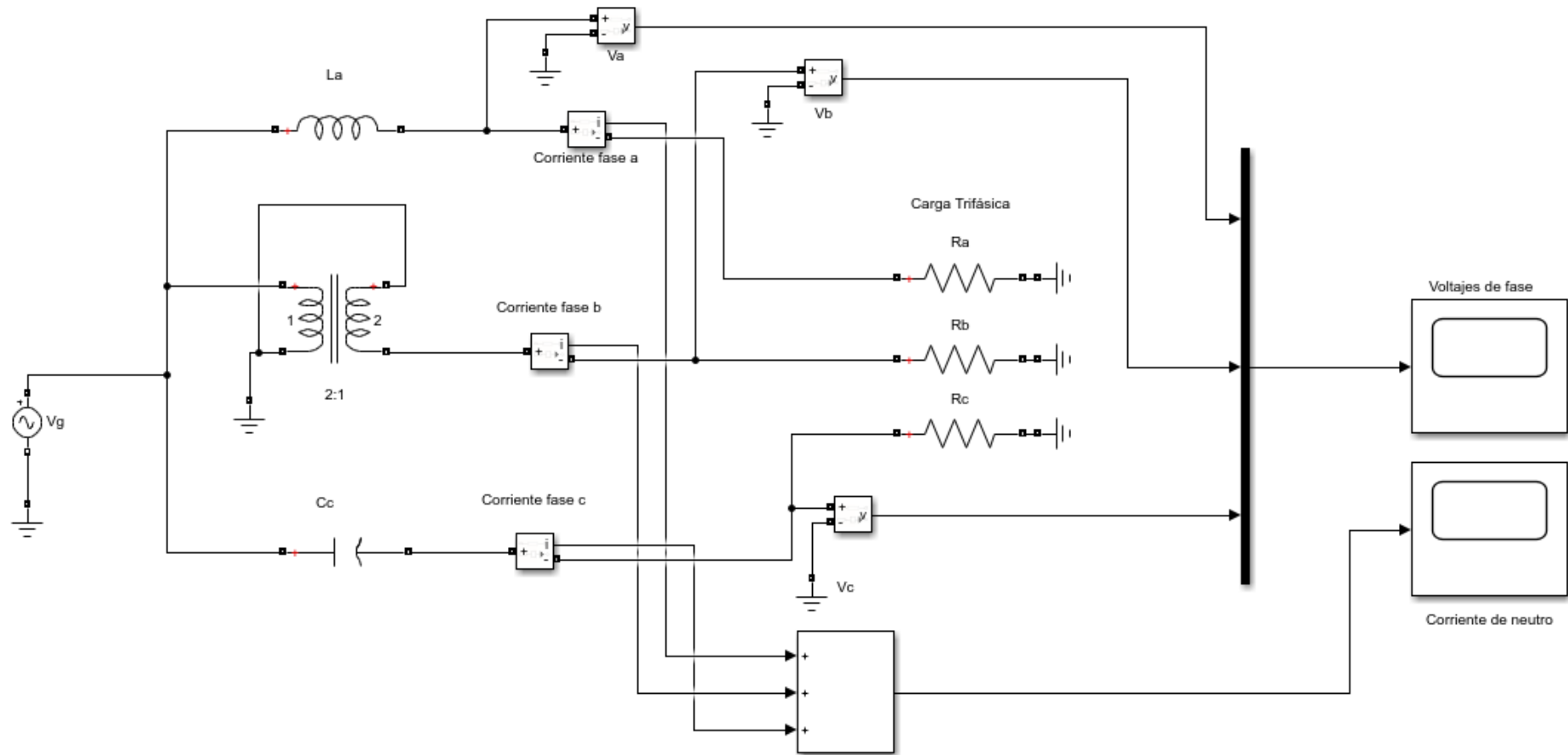
#### 4.2 Simulación del circuito en Simulink

Para las simulaciones se utiliza el programa MATLAB Simulink. El circuito conversor se muestra en la Figura 9. En la Figura 13 se muestra el diagrama de conexión obtenido en el programa Simulink. Los parámetros utilizados la simulación se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4** Parámetros de simulación.

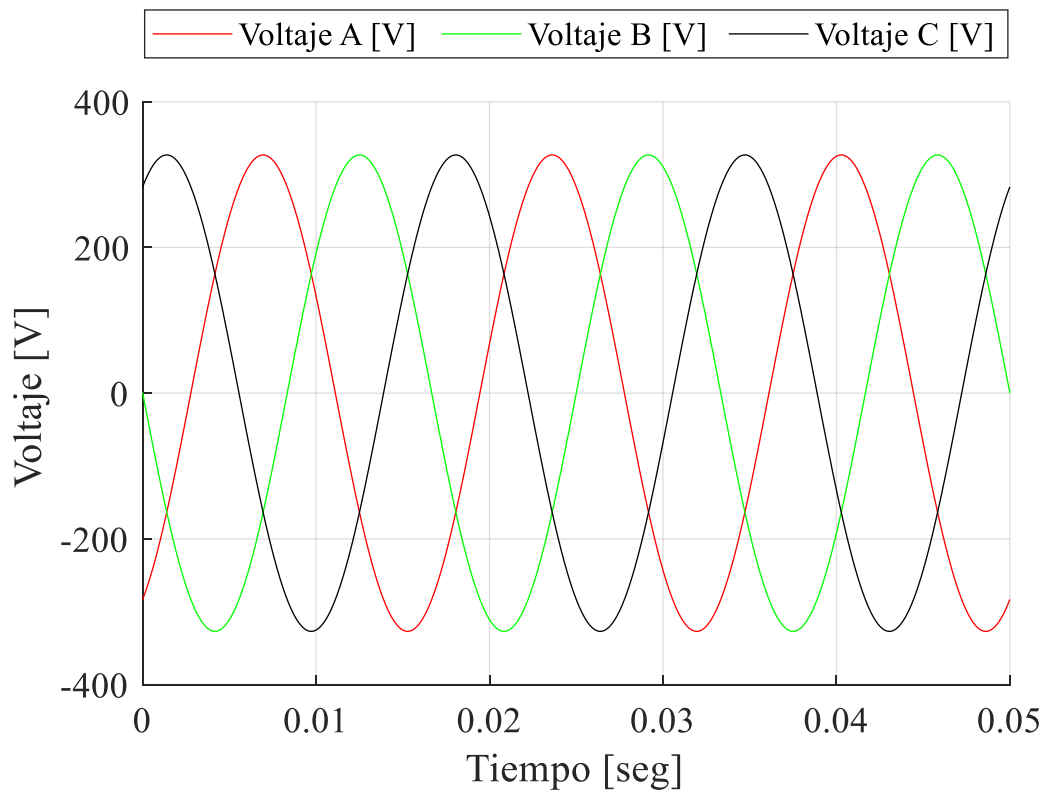
Descripción	Valor
<b>Inductancia del sistema de conversión</b>	-
$L_a$	0.6132 H
<b>Capacitancia del sistema de conversión</b>	-
$C_c$	11.47 $\mu$ F
<b>Carga</b>	-
Carga Nominal: R	133.46 $\Omega$
Frecuencia: $f$	60 Hz
<b>Transformador Monofásico:</b>	-
<b>Voltaje del primario: <math>V_1</math></b>	462V
<b>Voltaje del secundario: <math>V_2</math></b>	231V
Resistencia de cortocircuito: $R_{cc}$	0.002 p.u.
Reactancia de cortocircuito: $X_{cc}$	0.08 p.u.
Potencia Nominal: $P_n$	200 kVA
Resistencia de magnetización: $R_m$	500 p.u
Reactancia de magnetización: $X_m$	500 p.u
<b>Generador:</b>	-
$V_{pico}$	654 V
$V_{RMS}$	462 V

### 4.3 Análisis del circuito de prueba con carga resistiva nominal



**Figura 13** Implementación virtual del circuito de conversión de un sistema monofásico a trifásico con carga resistiva en Simulink.

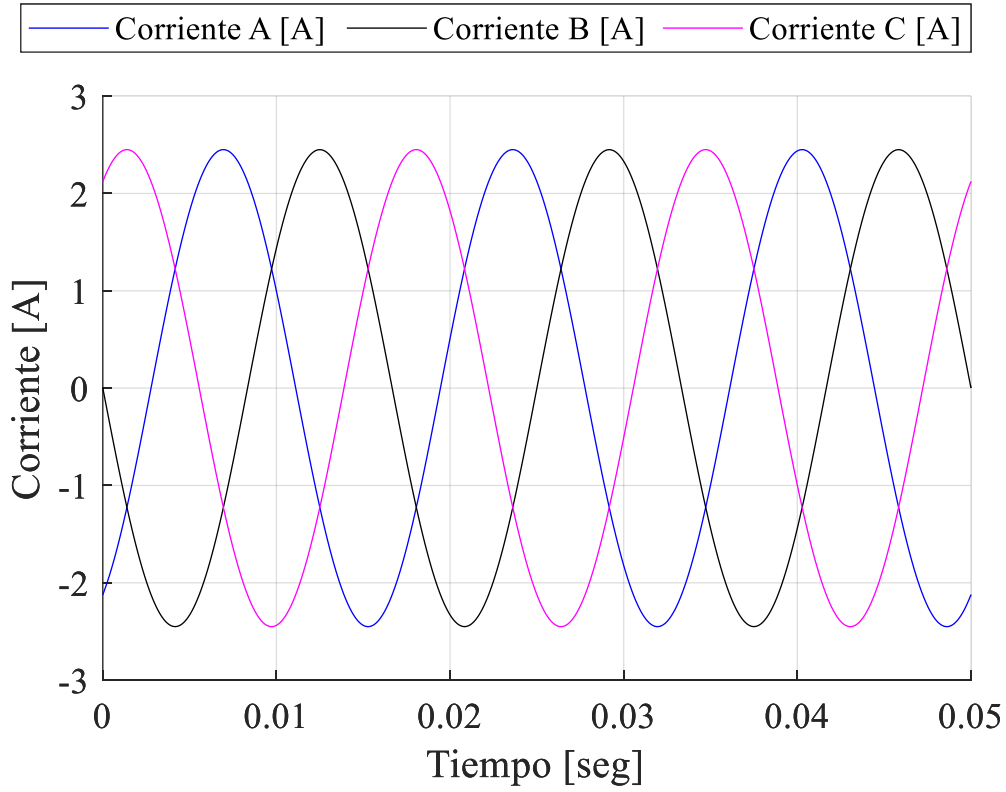
Elaborado por: Bruno Masabanda



**Figura 14** Voltajes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

La Figura 14 muestra las formas de onda de voltaje en cada una de sus fases es decir se analiza los voltajes con carga puramente resistiva:  $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$  de un sistema eléctrico que opera de forma balanceada, con voltajes desfasados  $120^\circ$ , demostrando el balance de voltajes que el sistema de conversión monofásico trifásico tiene con este escenario, usando carga resistiva. En las siguientes figuras se realiza una comparación de cada voltaje de fase con su respectiva corriente de fase.



**Figura 15** Corrientes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

Las formas de onda de corriente con carga puramente resistiva  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  producidas por el sistema de conversión monofásico/trifásico con carga nominal se muestran en la Figura 15. El cálculo del desbalance porcentual se detalla en [31]-[33], donde se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de desequilibrio (D\%)} = \frac{\text{Desviación máxima de la media}}{\text{Media de tres fases}} * 100 \quad (21)$$

Donde:

$$\text{Media de tres fases} = \frac{IF_a + IF_b + IF_c}{3} \quad (22)$$

$$\text{Desviación máxima} = \text{Media de tres fases} - IF_{\text{Menor}} \quad (23)$$

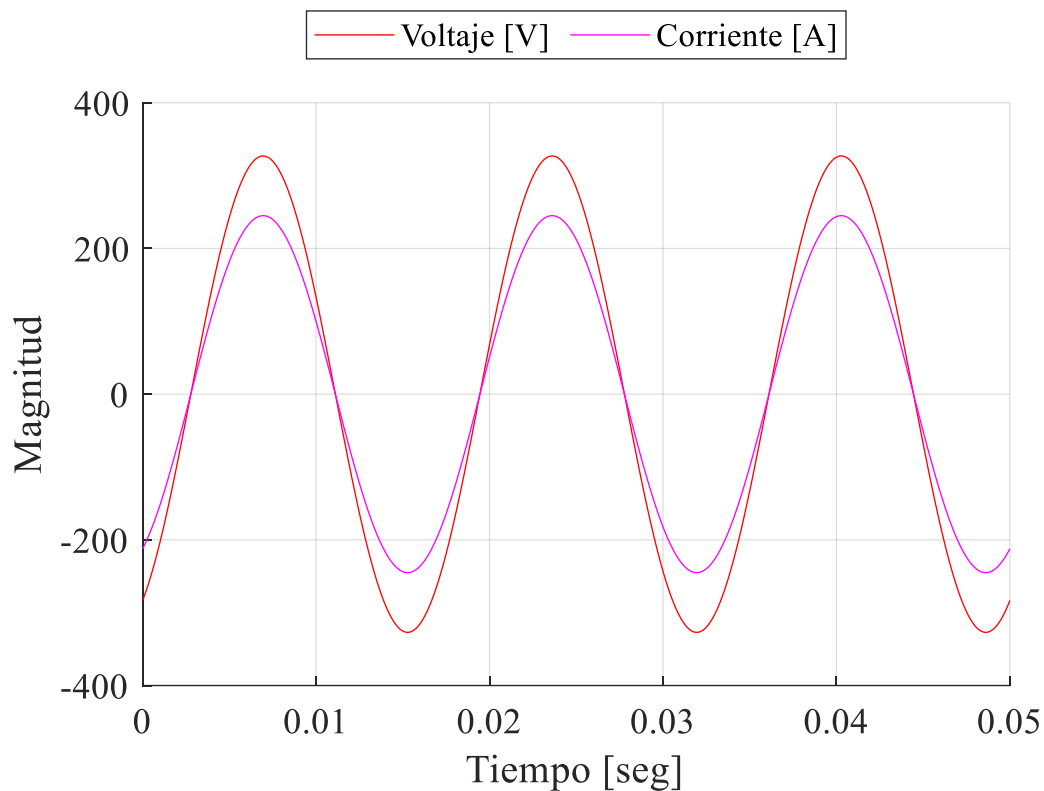
Una vez que se tiene las ecuaciones necesarias y los datos adecuados resolvemos las operaciones.

$$\text{Media de tres fases} = \frac{1.73 + 1.73 + 1.73}{3} = 1.73$$

$$\text{Desviación máxima} = 1.73 - 1.73 = 0$$

$$D\% = \frac{0}{1.73} * 100 = 0 \%$$

Analizando el porcentaje de desbalance se observa que no existe desbalance, ya que las corrientes obtenidas en todas sus fases son de 1,73 A *RMS*.

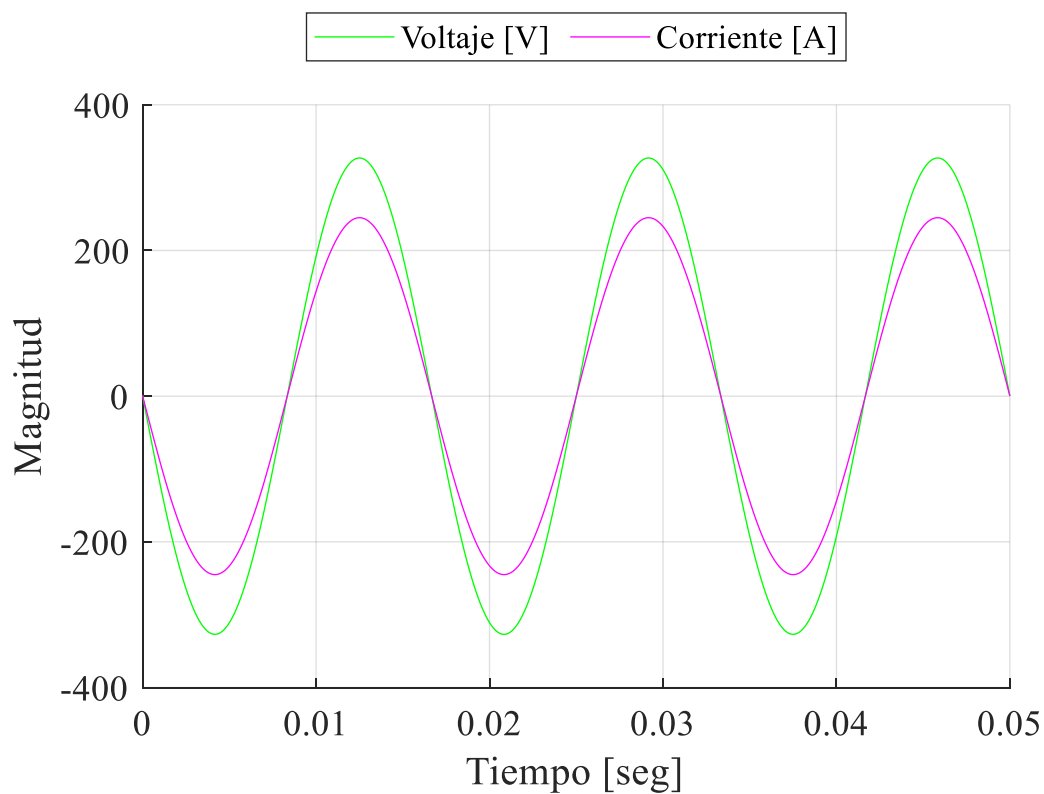


**Figura 16** Formas de onda de voltaje y corriente de fase A en circuito con carga puramente resistiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

En la Figura 16 se realiza la comparación entre el voltaje y la corriente de la fase A, ambos con carga resistiva pura, para poder evidenciar que ambas se encuentran en fase.

Se realiza un escalamiento donde se multiplica la magnitud de la onda de corriente en la salida por 100.

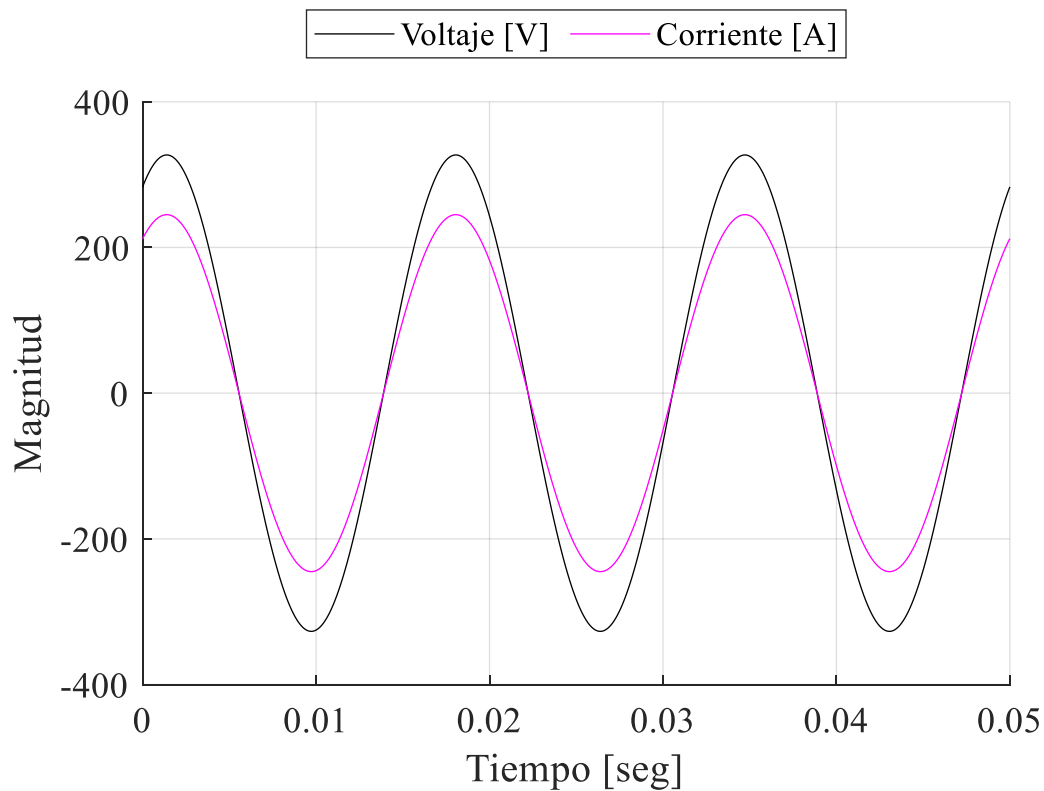


**Figura 17** Forma de onda de voltaje y corriente de fase B en circuito con carga puramente resistiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

En el caso de la Figura 17 se realiza una comparación entre el voltaje y la corriente de salida en la fase «B». Como se evidencia, el comportamiento en la fase «B» es idéntico que en la fase «A», con la excepción de que su desfase se corresponde con  $-120^\circ$ .

Se realiza un escalamiento donde se multiplica la magnitud de la onda de corriente en la salida por 100.



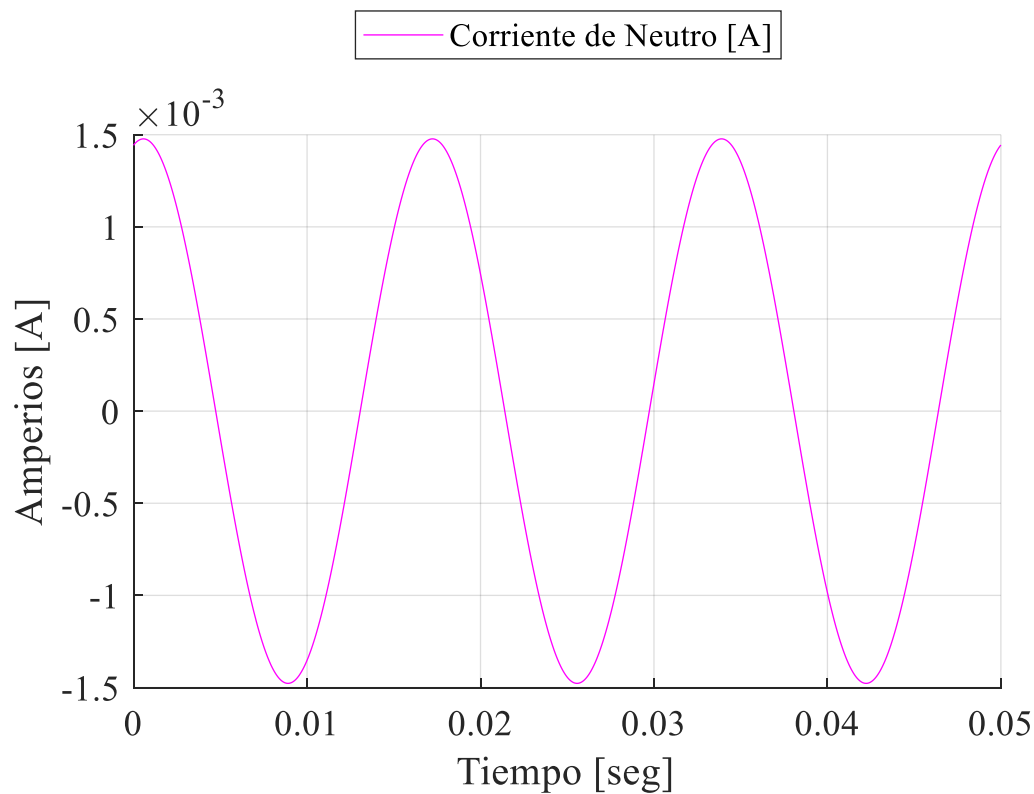
**Figura 18** Forma de onda de voltaje y corriente de fase C en circuito con carga puramente resistiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

Para el estudio de la fase «C» se consideración la Figura 18. Se observa un comportamiento simétrico al de las fases «A» y «B», en este caso la fase «C» se encuentra en adelante respecto a la fase «A». Se ha multiplicado la corriente de esta fase por una constante de valor 100. Es fácil observar que las ondas se encuentran en fase, y se verifica el correcto funcionamiento del sistema. Se corrobora que el sistema de conversión con carga puramente resistiva opera apropiadamente, sin desbalance ni en magnitud ni en fases.

Queda verificar que la corriente en el neutro de este sistema de conversión sea cero.





**Figura 19** Forma de onda de la corriente de neutro en el circuito con carga puramente resistiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

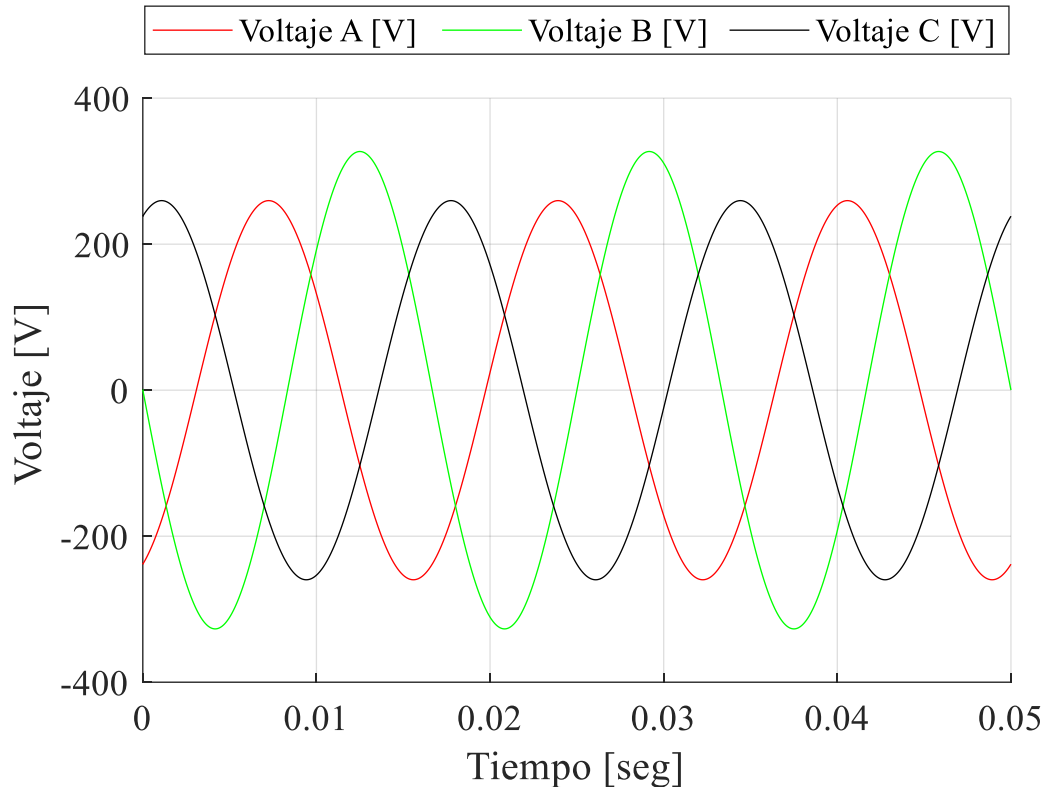
En la Figura 19 se grafica la forma de onda de la corriente de neutro del sistema de conversión con carga puramente resistiva donde el valor de amplitud es casi 1.5 mA, despreciable.

#### **4.3.1 Análisis del circuito de prueba con carga resistiva inferior a la nominal**

En el análisis previo se estudia la carga puramente resistiva donde existe un valor nominal establecido por el cual se basan los cálculos para los valores de capacitancia e inductancia correspondientes para que las simulaciones que se realizan proporcionen una estabilidad continua en el sistema de conversión. Pero ¿qué sucede si se altera el valor nominal de la carga puramente resistiva?

Este caso de estudio busca responder a la interrogante de qué ocurre cuando se intenta conectar una carga cuyo valor difiera del nominal, valor usado originalmente para

sintonizar los parámetros calculados en la Tabla 4. Se varía el valor nominal de  $133.46 \Omega$  a  $100 \Omega$ , sin el recálculo de los parámetros  $L_a$  y  $C_c$ .



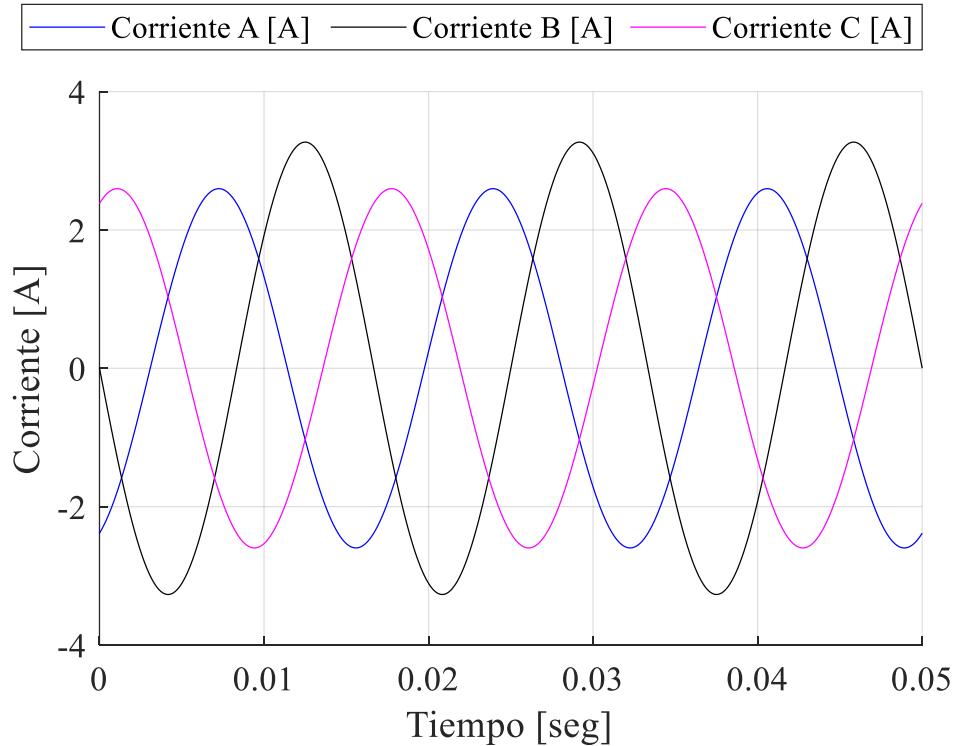
**Figura 20** Voltajes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistiva de  $100 \Omega$ .

Elaborado por: Bruno Masabanda

En la Figura 20 se muestran los voltajes  $V_{a(100\Omega)}$ ,  $V_{b(100\Omega)}$  y  $V_{c(100\Omega)}$  es decir en las tres fases sobre la carga resistiva. Se puede observar que el sistema tiende a un desbalance en una de sus fases, específicamente en la «B». Esto implica la inoperatividad del sistema de conversión monofásico trifásico ya que por teoría se sabe que un sistema trifásico tan desbalanceado no es útil para suministrar potencia a las cargas que se deseen alimentar.

El desbalance se produce debido a que los valores de inductancia  $L_a$  y capacitancia  $C_c$  no fueron recalculados en base al cambio que se produjo en el valor de la carga nominal, ya que para un adecuado funcionamiento del sistema estos valores mencionados deben ser calculados en base al aumento o decremento de dicha carga, si se mantiene los valores

de inductancia y capacitancia obtenidos mediante el valor de la carga nominal original el sistema tiende a desbalancearse y esto puede ocasionar daños de maquinarias.



**Figura 21** Corrientes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistiva 100Ω.

Elaborado por: Bruno Masabanda

Las corrientes  $I_{a(100\Omega)}$ ,  $I_{b(100\Omega)}$  e  $I_{c(100\Omega)}$  por tanto tienen un comportamiento similar al voltaje, dado que la carga es resistiva pura de la Figura 21.

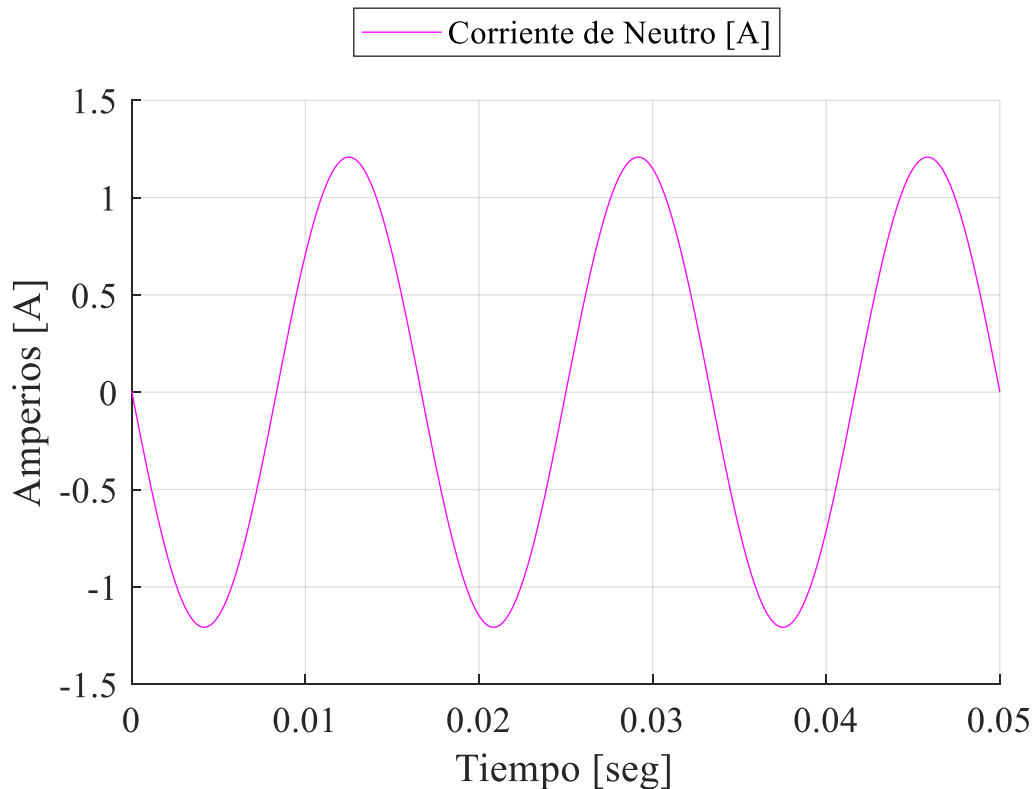
Se utiliza la ecuación (21), (22) y la (23) para calcular el porcentaje de desequilibrio presente este caso de estudio. Los datos necesarios para determinar dichos valores se los toma de la simulación los cuales son:  $I_a = 1.84 [A]_{RMS}$ ,  $I_b = 2.31 [A]_{RMS}$ ,  $I_c = 1.84 [A]_{RMS}$ .

$$\text{Media de tres fases} = \frac{2.31 + 1.84 + 1.84}{3} = 1.9967[A]_{RMS}$$

$$\text{Desviación máxima} = 1.9967 - 1.84 = 0.1567$$

$$D\% = \frac{0.1567}{1.9967} * 100 = 7.85 \%$$

Si se analiza el porcentaje de desbalance se determina que existe aproximadamente un 7.85 % de desequilibrio entre las corrientes de fase, superando por mucho el rango permitido para la operación de un sistema trifásico el cual es de 3 %.



**Figura 22** Forma de onda de la corriente de neutro en el circuito con carga puramente resistiva de 100  $\Omega$ .

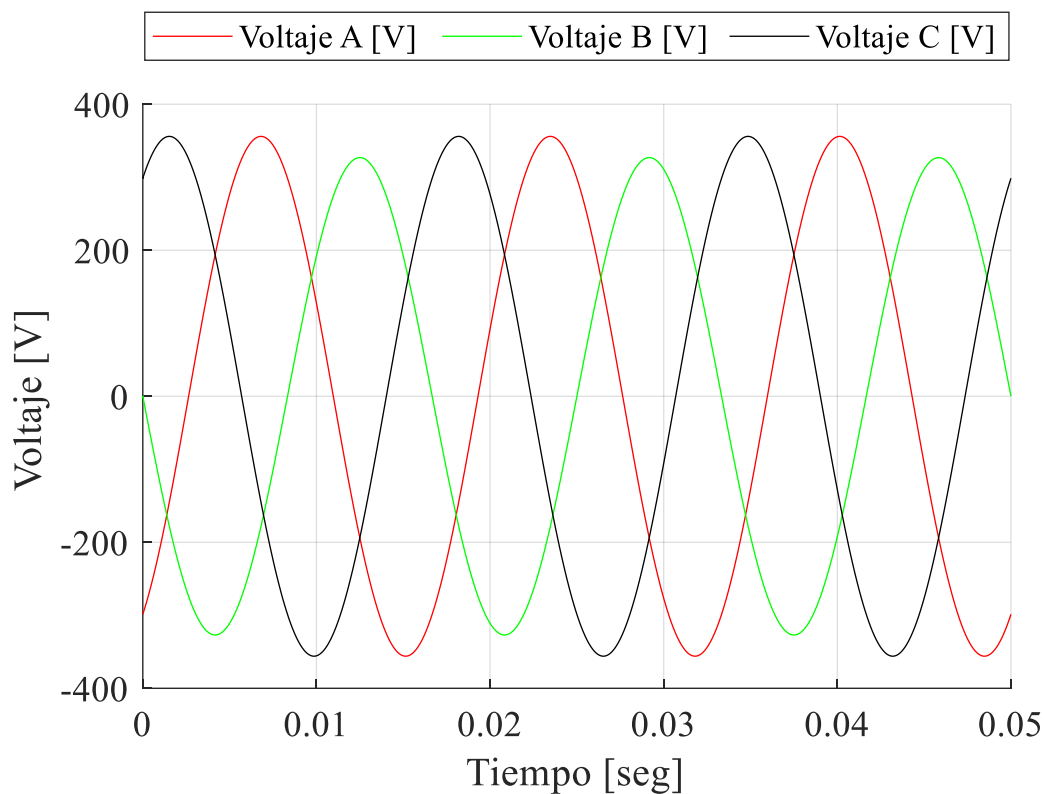
Elaborado por: Bruno Masabanda

La corriente en el neutro del sistema de conversión con carga igual a 100  $\Omega$  en la Figura 22 se incrementa debido al desequilibrio provocado por la alteración de la fase «B», dado que por teoría la corriente de neutro es igual a la sumatoria de las corrientes de fase del sistema. Esta corriente debe ser nula o muy cercana a este valor para que el sistema garantice la operatividad del sistema de conversión. Se deduce que, para una carga puramente resistiva diferente del valor nominal, es esencial un recálculo de los parámetros  $L_a$  y  $C_c$  para obtener un sistema balanceado.

#### 4.3.2 Análisis del circuito de prueba con carga resistiva superior a la nominal

En este apartado se realiza un estudio similar al de la sección 4.3.1, es decir, ¿qué sucede si se altera el valor de carga nominal y no se recalculan los valores de inductancia  $L_a$  y capacitancia  $C_c$ ? Para este caso en particular se procede a aumentar el valor de la carga nominal puramente resistiva, y no se recalculan los valores de  $L_a$  y  $C_c$  que son importantes para balancear el sistema.

En este caso se realiza un cambio en la carga del sistema y se varía del valor original de  $133.46 \Omega$  a  $150 \Omega$  es decir un aumento respecto de la carga nominal.



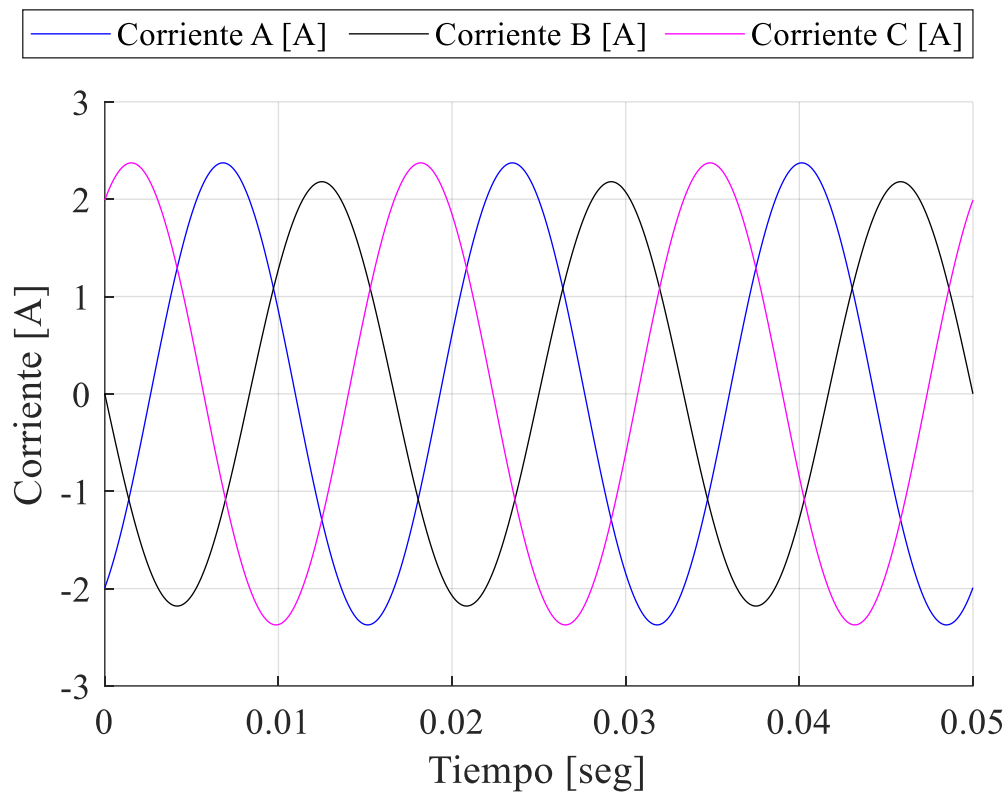
**Figura 23** Voltajes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistiva  $150 \Omega$ .

Elaborado por: Bruno Masabanda

En la Figura 23 se analiza los voltajes  $V_{a(150\Omega)}$ ,  $V_{b(150\Omega)}$  y  $V_{c(150\Omega)}$  el sistema de conversión con carga puramente resistiva donde se destaca un aumento de su valor nominal, donde en sus tres fases se observa un comportamiento inverso al caso anterior, ya que en este caso no existe un aumento sino una disminución del voltaje en la fase «B»,

un decremento del nivel del voltaje en alrededor de 20 [V]. Un comportamiento similar se presenta para las corrientes, dado que la carga es resistiva pura de la Figura 24.

El desbalance que se produce en este caso es debido a la omisión de recalcular nuevamente los valores de  $L_a$  y  $C_c$ , valores que son de suma importancia y deben ir acorde con el incremento o decremento de la carga, estos valores de inductancia y capacitancia son parte fundamental del sistema de conversión con ellos se logra una conversión exitosa y estable. Para los casos de carga puramente resistiva es necesario tener en cuenta el recalcu de  $L_a$  y  $C_c$ , caso contrario si se omite este procedimiento se presentarán inconvenientes como se muestra en la Figura 23



**Figura 24** Corrientes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistiva 150  $\Omega$ .

Elaborado por: Bruno Masabanda

Se analizan las corrientes generadas con la alteración del valor nominal de la carga puramente resistiva las cuales son:  $I_{a(150\Omega)}$ ,  $I_{b(150\Omega)}$  e  $I_{c(150\Omega)}$  y se realiza el procedimiento previo para la obtención del desbalance porcentual. Los datos necesarios

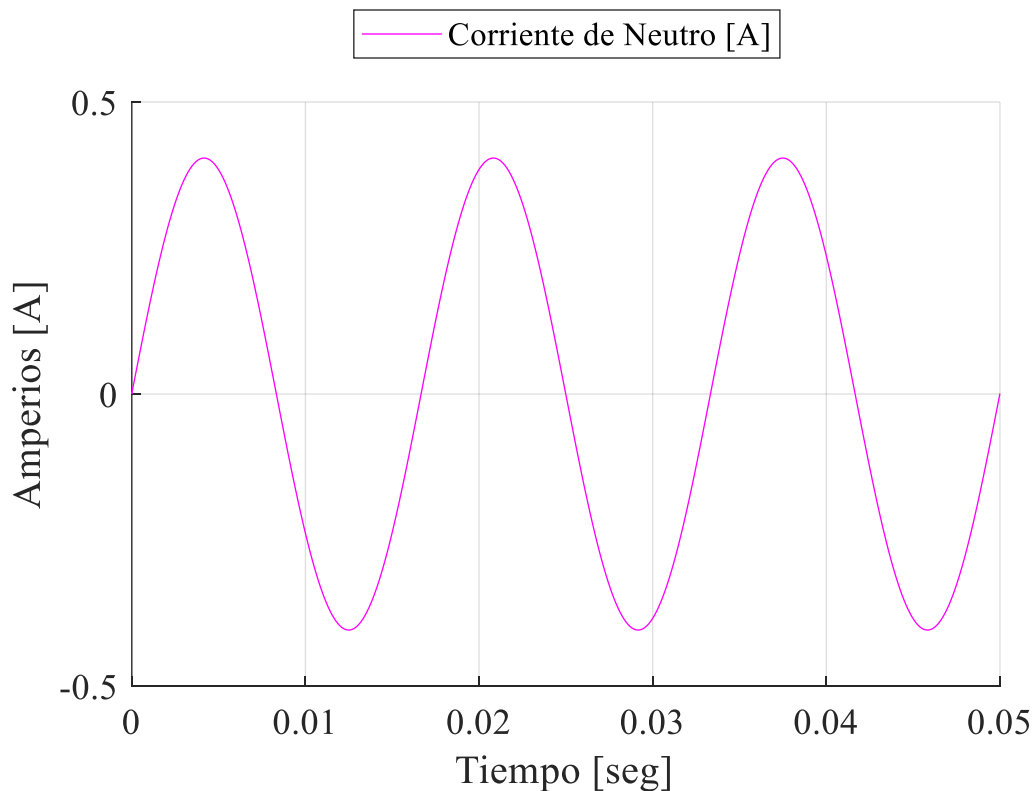
para determinar dichos valores se los toma de la simulación los cuales son:  $IF_a = 1.68 [A]_{RMS}$ ,  $IF_b = 1.54 [A]_{RMS}$ ,  $IF_c = 1.68 [A]_{RMS}$ .

$$\text{Media de tres fases} = \frac{1.54 + 1.68 + 1.68}{3} = 1.63 [A]_{RMS}$$

$$\text{Desviación máxima} = 1.63 - 1.54 = 0.093$$

$$D\% = \frac{0.093}{1.63} * 100 = 5.72 \%$$

El desbalance producido es casi del 6%, a pesar de ser no tan grande se encuentra fuera del rango permitido que en las redes trifásicas se considera aceptable hasta un 3%, lo cual impide la correcta operación balanceada.



**Figura 25** Forma de onda de la corriente de neutro en el circuito con carga puramente resistiva de  $150\Omega$ .

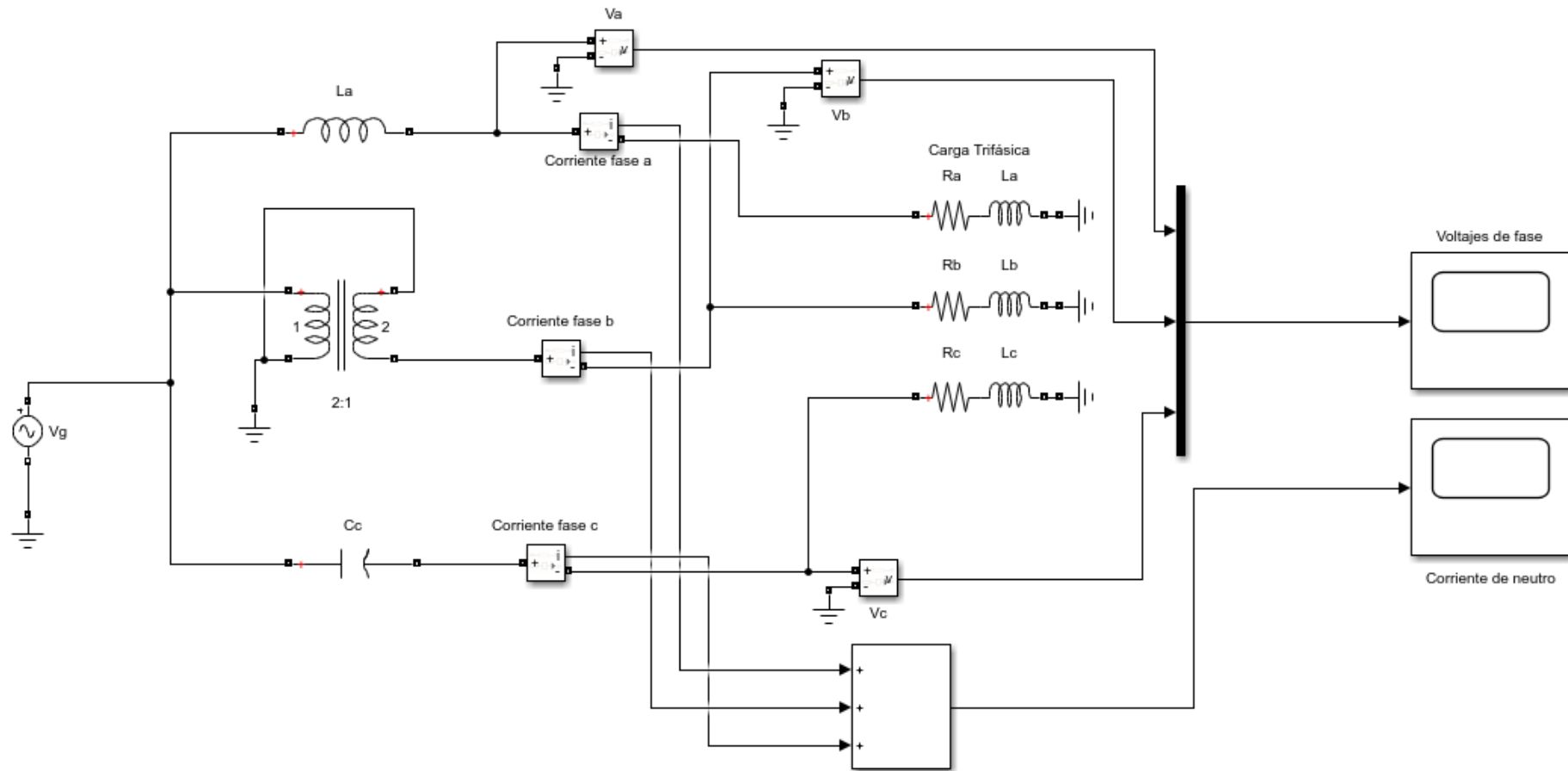
Elaborado por: Bruno Masabanda

En la Figura 25 se muestra la forma de onda de la corriente en el neutro del sistema de conversión con aumento respecto de su carga nominal, donde queda en evidencia el desbalance de corrientes en la carga, al igual que el caso precedente.

Para ambos escenarios de cargas, sin modificar los parámetros de sintonización del sistema de conversión monofásico trifásico, se pierde la posibilidad de obtener voltajes balanceados en magnitud, aunque no en fase pues se sigue conservando el desfase de  $120^\circ$  entre las formas de onda del voltaje. Cada vez que se cambie la carga resistiva respecto de su valor nominal, implica necesariamente una nueva sintonización de los parámetros para garantizar el balance en magnitud de las tensiones de fase.

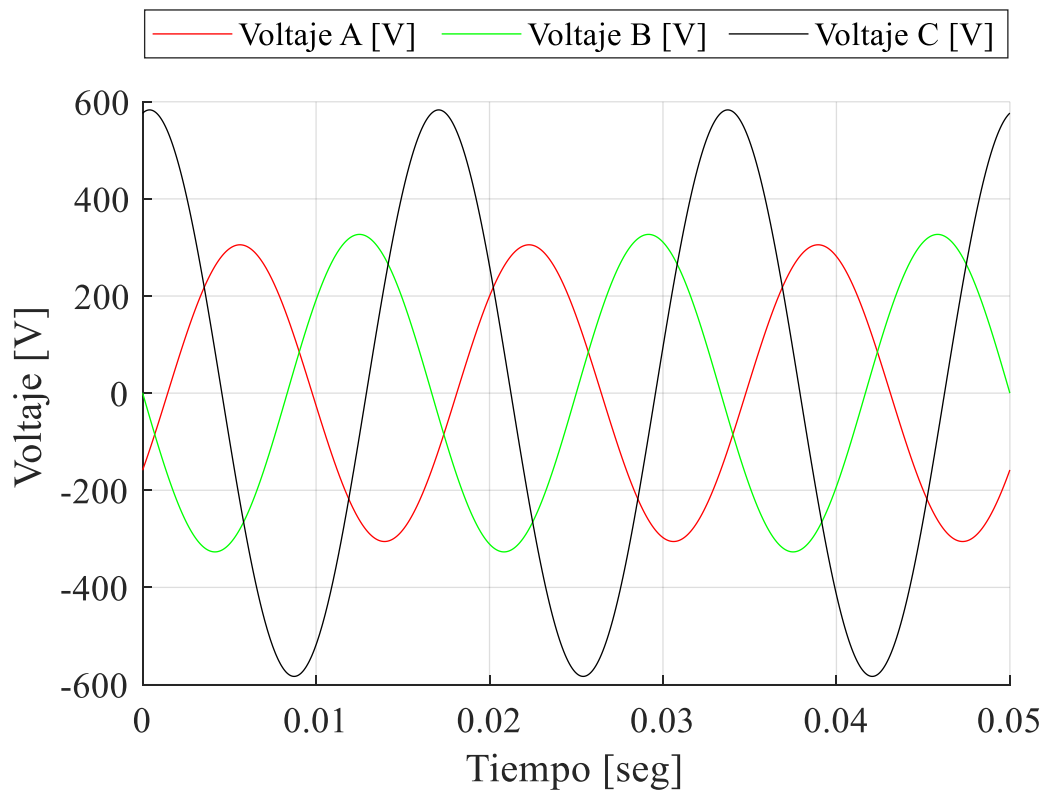


#### 4.4 Análisis del circuito de prueba con carga en serie resistencia e inductancia



**Figura 26** Implementación virtual del circuito de conversión de un sistema monofásico a trifásico con carga resistivo-inductiva en Simulink.

Elaborado por: Bruno Masabanda

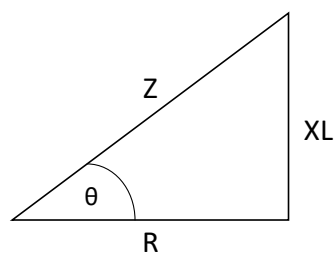


**Figura 27** Voltajes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistivo-inductiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

Al modificar la carga puramente resistiva por otra carga del tipo resistivo-inductiva (RL) como se ve en la Figura 26, donde se analizan los voltajes  $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$ , el comportamiento del sistema de conversión se ve alterado en la fase «C» tal como se muestra en la Figura 27. Para el modelamiento con carga RL (resistiva e inductiva) se realizan los cálculos que se detallan a continuación.

Para el cálculo de la reactancia inductiva es necesario emplear el triángulo de impedancias que se muestra en la Figura 28.



**Figura 28** Triángulo de impedancias para el cálculo de reactancia inductiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

Para este cálculo se considera un factor de potencia  $fp = 0.8$  en atraso, y la resistencia trifásica con la que se trabaja en la simulación de carga puramente resistiva, es decir  $R = 133.46 \Omega$ .

**Tabla 5** Cálculo del valor del ángulo de carga por medio del factor de potencia.

Fórmula	Cálculo	Resultado
$\theta = \cos^{-1}(fp)$		
Donde: $\theta$ = Ángulo. $fp$ = Factor de potencia.	$\theta = \cos^{-1}(0.8)$	$\theta = 36.87^\circ$

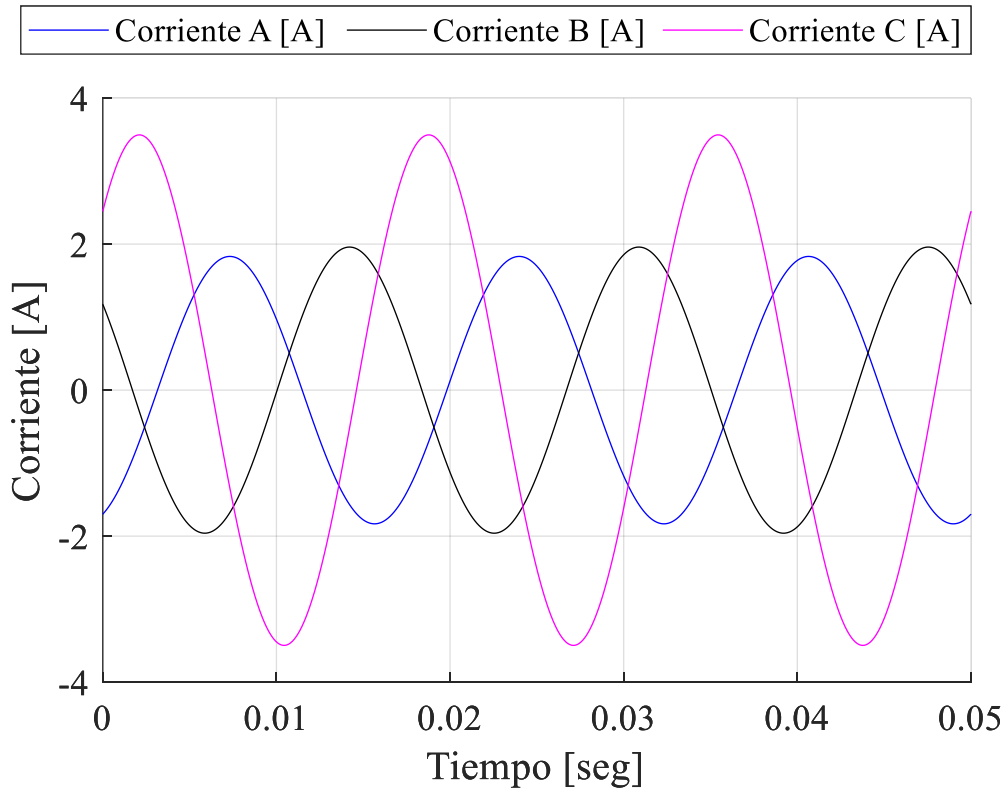
**Tabla 6** Cálculo del valor de reactancia inductiva.

Fórmula	Cálculo	Resultado
$\tan \theta = \frac{X_L}{R}$		
Donde: $X_L$ = Reactancia inductiva. $R$ = Valor de resistencia. $X_L = R * \tan \theta$	$X_L = 133.46 * \tan(36.87^\circ)$	$X_L = 100.095 \Omega$

**Tabla 7** Cálculo del valor del inductor.

Fórmula	Cálculo	Resultado
$X_L = 2\pi fL$		
Donde: $f$ = Frecuencia. $L$ = Valor del inductor. $L = \frac{X_L}{2\pi f}$	$L = \frac{100.095}{2 * \pi * 60}$	$L = 0.2655 H$

Analizando la Figura 27 se observa el desbalance en una de las fases del sistema de conversión específicamente en la fase «C», donde se ve un incremento en el voltaje que alcanza los 600 [V], casi el doble en comparación con las otras fases del sistema. Este sistema no está balanceado. Un análisis de voltaje y corriente de cada una de las fases se realiza en las siguientes figuras.



**Figura 29** Corrientes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistivo-inductivo.

Elaborado por: Bruno Masabanda

Las corrientes producidas por el tipo de carga RL son  $I_a, I_b$  e  $I_c$ , donde el comportamiento que adoptan estas corrientes es similar al de los voltajes estudiados en la Figura 27 de igual manera es necesario la aplicación de las ecuaciones (21), (22) y (23). Los datos necesarios para determinar dichos valores se los toma de la simulación los cuales son:  $IF_a = 1.29 [A]_{RMS}$ ,  $IF_b = 1.39 [A]_{RMS}$ ,  $IF_c = 2.47 [A]_{RMS}$ .

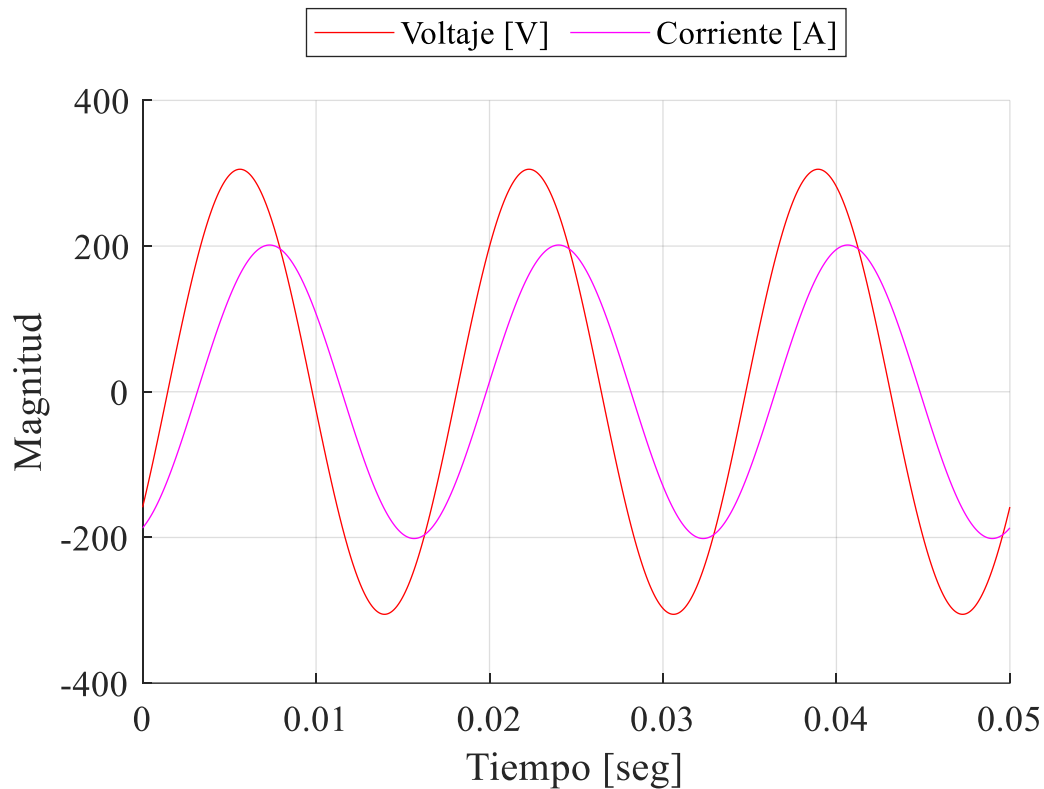
$$\text{Media de tres fases} = \frac{1.39 + 2.47 + 1.29}{3} = 1.7167 [A]_{RMS}$$

$$\text{Desviación máxima} = 1.7167 - 1.29 = 0.4267$$

$$D\% = \frac{0.4267}{1.7167} * 100 = 24.85 \%$$

Analizando el desbalance de corrientes para el caso de la Figura 29, una vez más se realiza el cálculo porcentual de desequilibrio entre las corrientes como se muestra en [31],

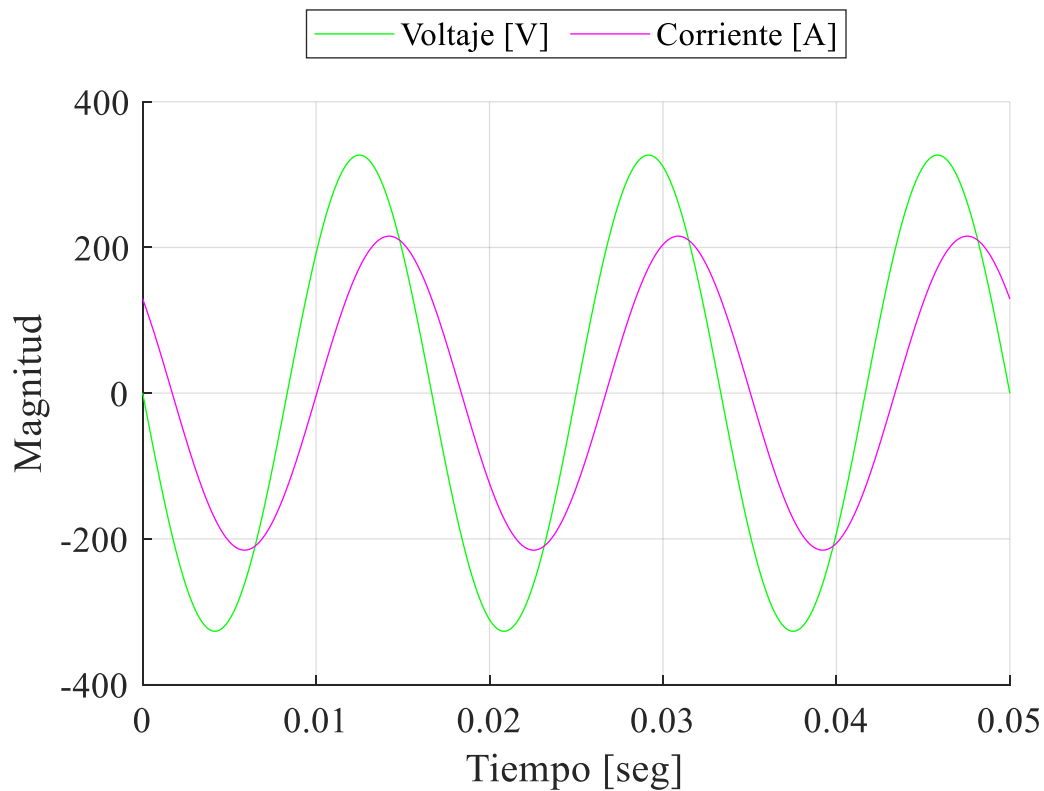
dando como resultado un desbalance del 24,85 %, un valor que indica la inoperatividad del sistema, debido a que se encuentra fuera de rango admisible para su operación.



**Figura 30** Forma de onda de voltaje y corriente en fase A en circuito con carga resistivo-inductivo.

Elaborado por: Bruno Masabanda

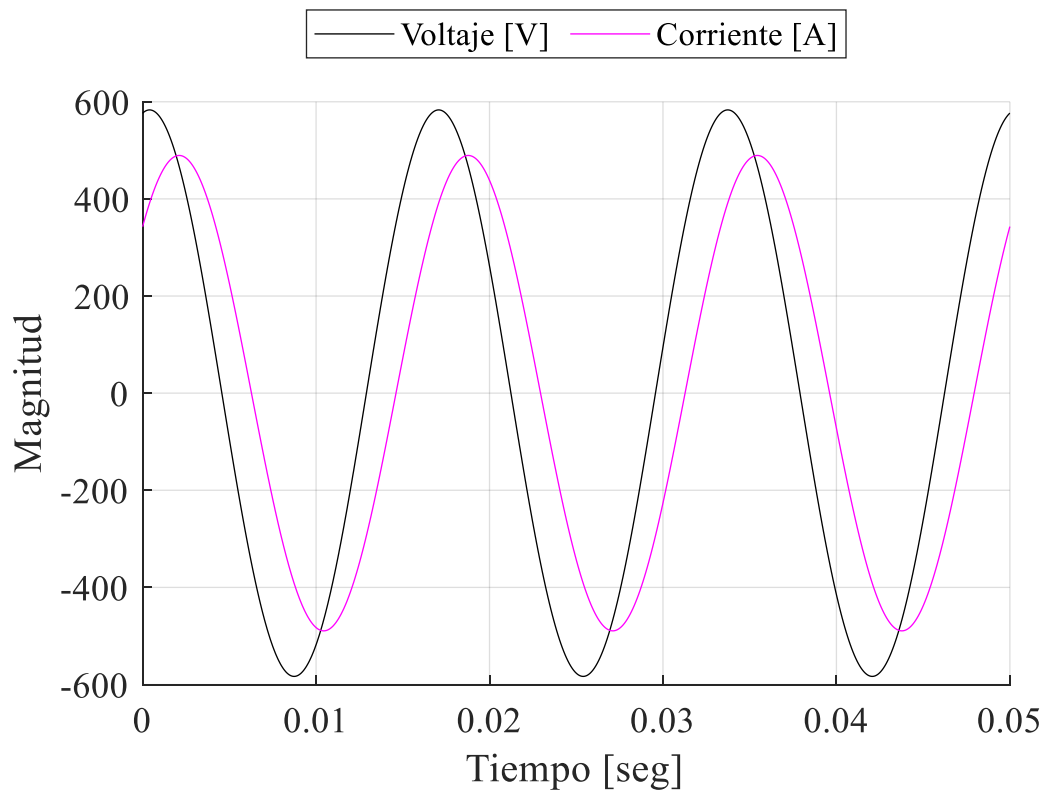
En la fase A se observa que el voltaje no tiene variación respecto al sistema con carga puramente resistiva, es decir que se mantiene el voltaje en 300 [V]. Con el uso de un factor de 110 a la salida de corriente de fase A, se evidencia un desfase en atraso con respecto a su corriente de acuerdo con la carga alimentada por este sistema.



**Figura 31** Forma de onda de voltaje y corriente de fase B en circuito con resistivo-inductivo.

Elaborado por: Bruno Masabanda

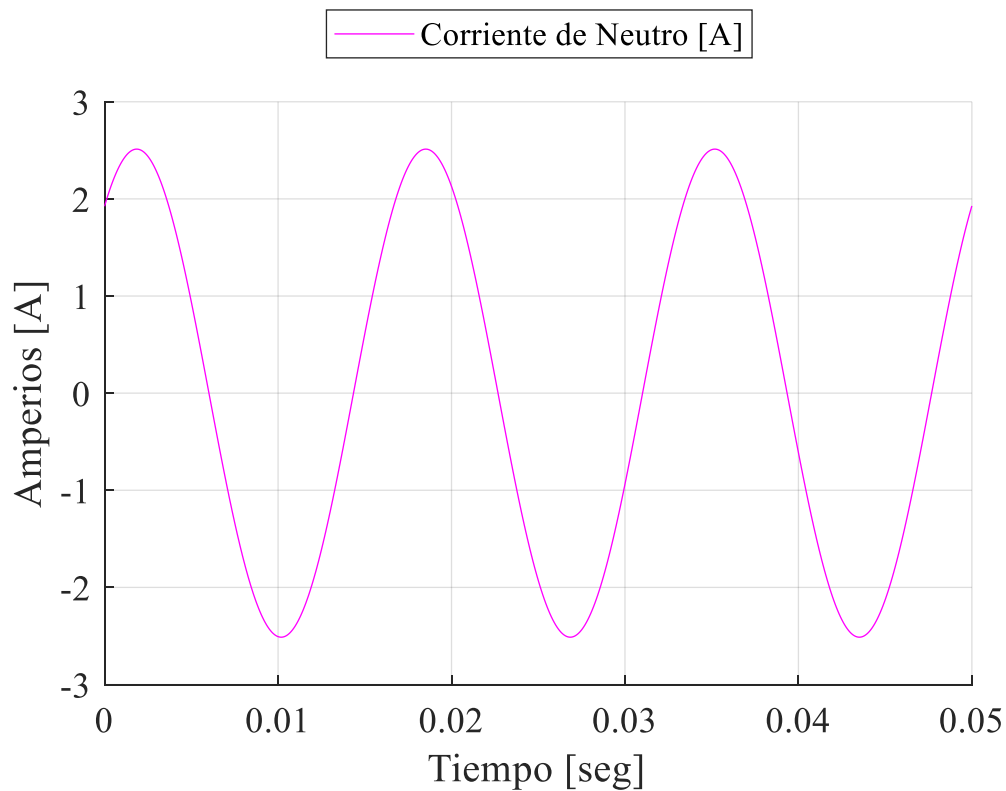
En la Figura 31 se observa la fase B, su voltaje y corriente, de igual manera se realiza el procedimiento anterior para incrementar la magnitud de la forma de onda de la corriente para poder apreciarla de mejor manera, el factor multiplicativo es de 110. Analizando las ondas se observa que existe un desfase entre el voltaje y la corriente, donde la corriente se encuentra atrasada respecto al voltaje, debido a la carga resistivo-inductiva.



**Figura 32** Forma de onda de voltaje y corriente de fase C en circuito con carga resistivo-inductiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

En la Figura 32 se observa la salida en voltaje y corriente de la fase C. Hay un desbalance en comparación con la Figura 30 y la Figura 31 en los voltajes ya que la magnitud es casi 600 [V], el doble respecto de las fases «A» y «B». Se comprueba que al estar conectado a una carga RL, el sistema de conversión monofásico trifásico no opera de manera balanceada, ya que una de las fases, en este caso específico la fase «C», incrementa su magnitud. La constante utilizada para el incremento de la forma de onda de la corriente fue de 140.



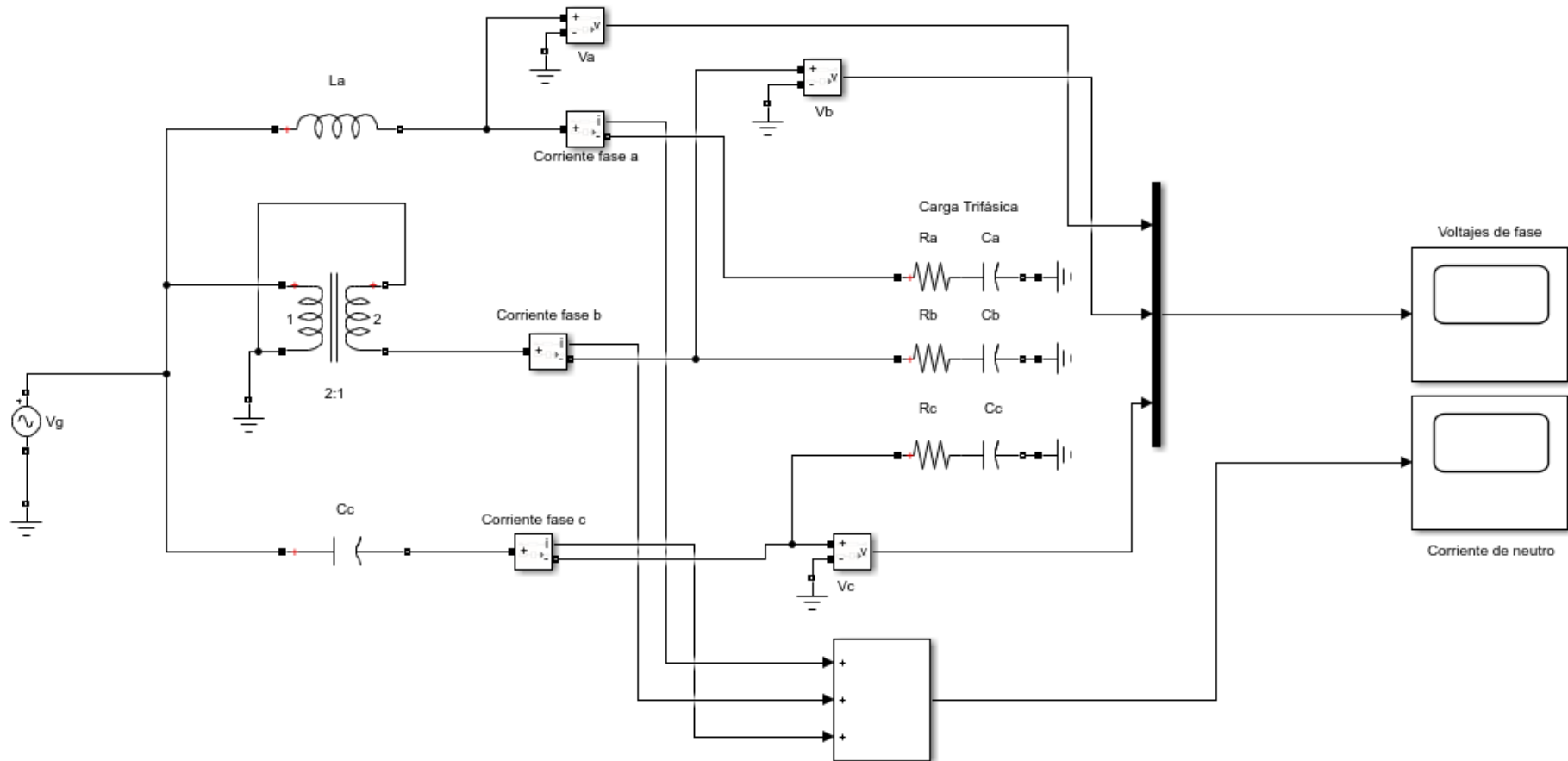
**Figura 33** Forma de onda de corriente de neutro en circuito con carga resistivo-inductivo.

Elaborado por: Bruno Masabanda

La corriente del neutro para este sistema de conversión monofásico trifásico con carga RL es de 2.5 [A] *pico*, tal como se observa en la Figura 33. Se deduce que el sistema está trabajando de forma desbalanceada ya que una corriente de neutro con esta magnitud indica un desbalance significativo en la carga.

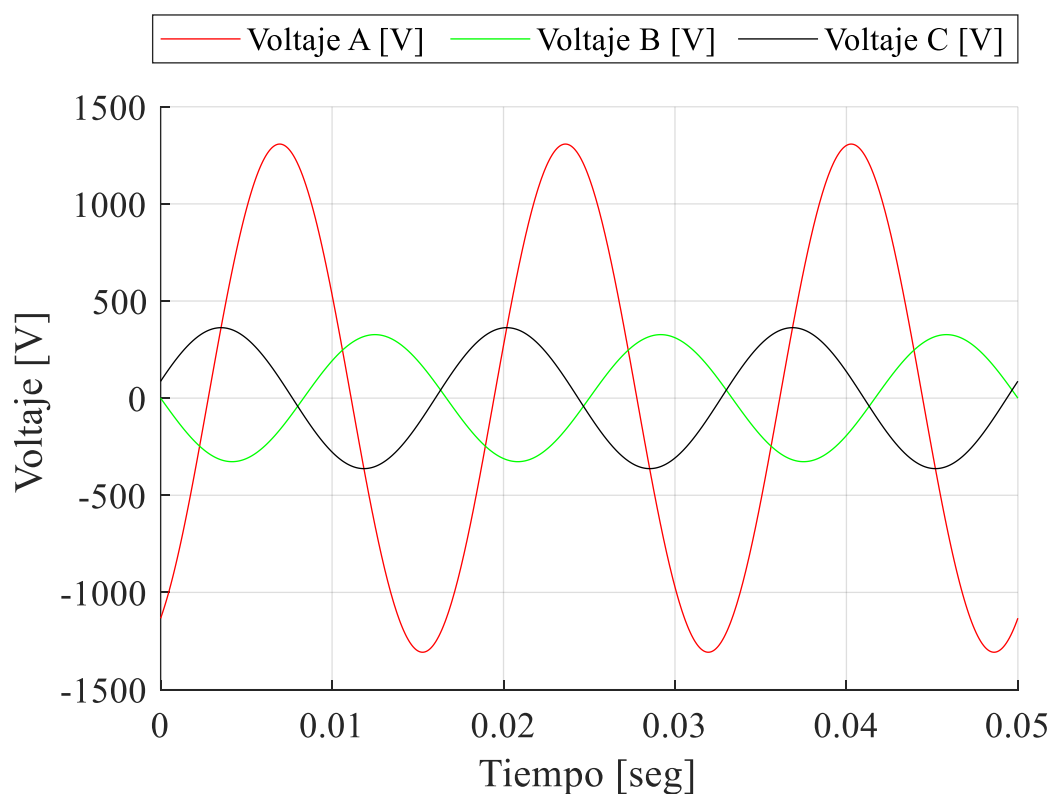


#### 4.5 Análisis del circuito de prueba con carga en serie resistencia y capacitancia



**Figura 34** Implementación virtual del circuito de conversión de un sistema monofásico a trifásico con carga resistivo-capacitivo en Simulink.

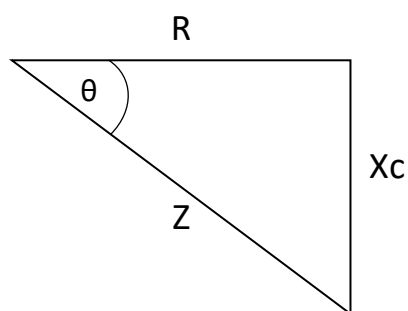
Elaborado por: Bruno Masabanda



**Figura 35** Voltajes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistivo-capacitiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

Otra de las pruebas realizadas al sistema de conversión monofásico trifásico fue cambiar la carga resistiva por una carga RC (del tipo resistivo-capacitivo) serie, tal como se muestra en la Figura 34. Para el cálculo de la reactancia capacitiva se considera el mismo valor de factor de potencia, así como la misma resistencia trifásica. Se calcula la impedancia capacitiva que se emplea en la simulación del circuito:



**Figura 36** Triángulo de impedancias para el cálculo de reactancia capacitiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

**Tabla 8** Cálculo del valor del ángulo por medio del factor de potencia en adelanto.

Fórmula	Cálculo	Resultado
$\theta = -\cos^{-1}(fp)$		
Donde: $\theta$ = Ángulo. $fp$ = Factor de potencia.	$\theta = -\cos^{-1}(0.8)$	$\theta = -36.87^\circ$

**Tabla 9** Cálculo del valor de reactancia capacitiva.

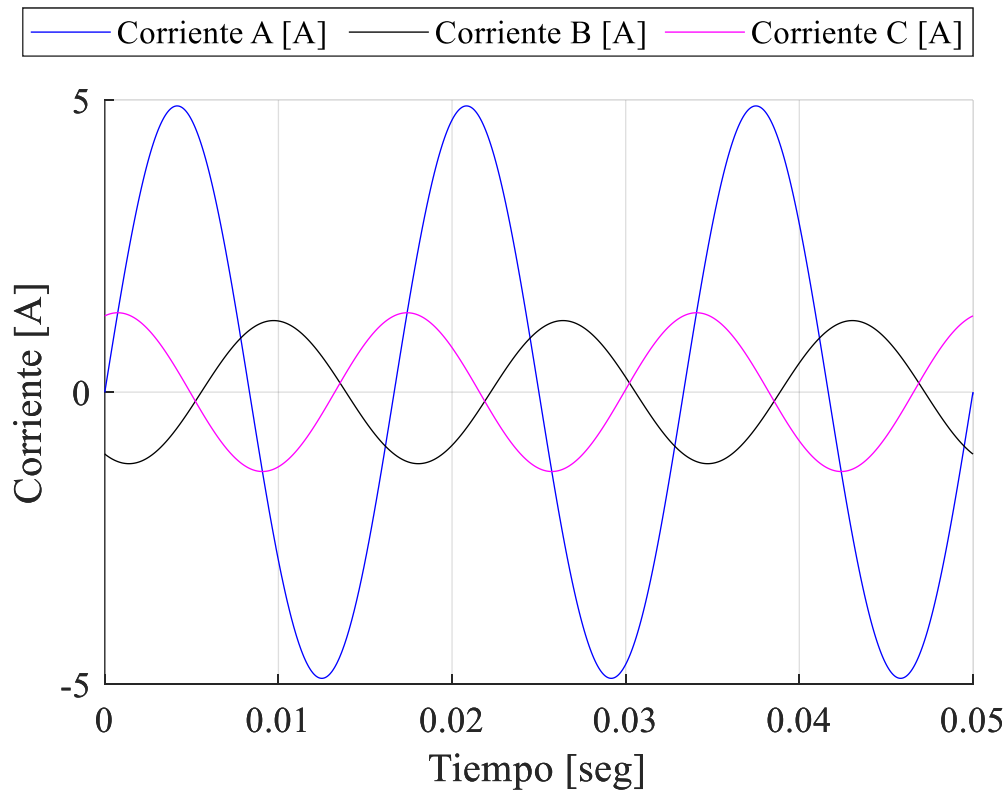
Fórmula	Cálculo	Resultado
$\tan \theta = \frac{X_c}{R}$		
Donde: $X_c$ = Reactancia capacitiva. $R$ = Valor de resistencia.	$X_c = -133.46 * \tan(36.87^\circ)$	$X_c = -100.095 \Omega$
$X_c = R * \tan \theta$		

**Tabla 10** Cálculo del valor del capacitor.

Fórmula	Cálculo	Resultado
$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$		
Donde: $f$ = Frecuencia. $C$ = Valor del Capacitor.	$C = \frac{1}{2 * \pi * 60 * 100.095}$	$C = 0.02650 \times 10^{-3} F$
$C = \frac{1}{2\pi fX_c}$		

En la Figura 35 se observa un comportamiento similar al circuito con carga RL, dos voltajes de fase se mantienen con valores similares en magnitud «B» y «C» y la otra fase «A» se ve alterada en su amplitud llegando a los 1300 [V].

Se muestran las ondas de salida de voltaje y corriente de cada una de las fases del sistema en las figuras siguientes:



**Figura 37** Corrientes de fase del sistema de conversión monofásico trifásico con carga resistiva-capacitiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

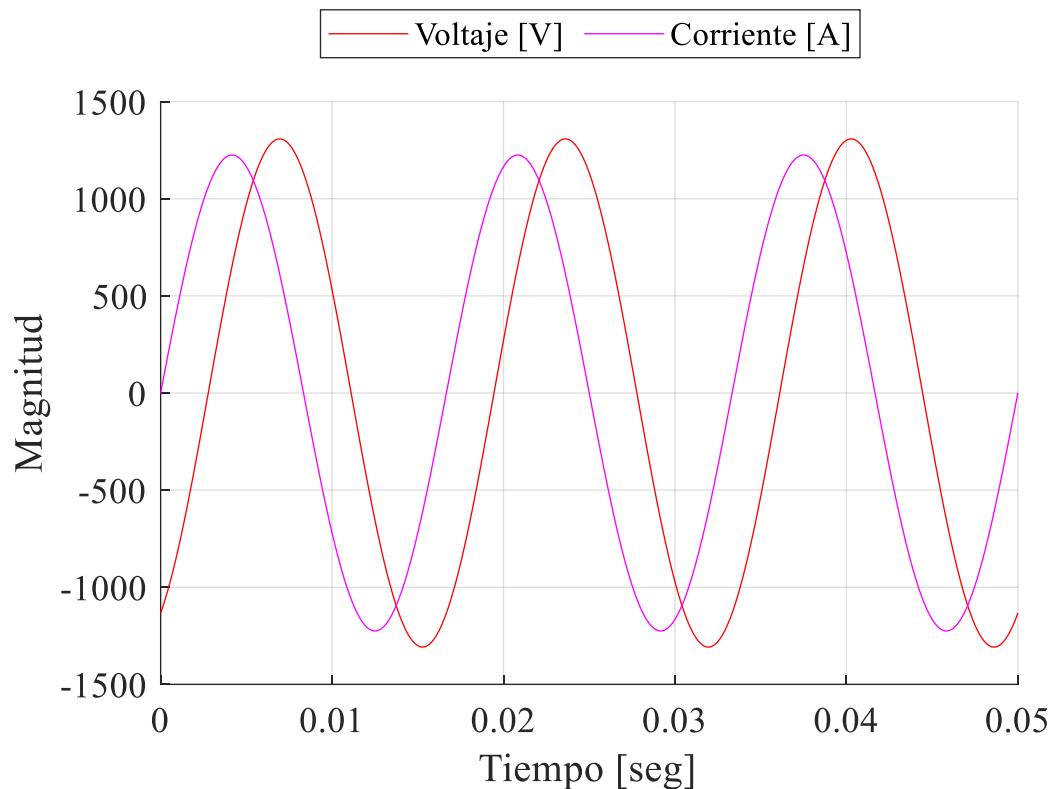
La Figura 37 nos proporciona gráficamente el comportamiento que tienen las corrientes  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  cuando se cambia la carga puramente resistiva por una carga RC, llegando a la conclusión que las corrientes tienden a tener el mismo comportamiento que sus voltajes en sus fases respectivas. Una vez más es necesario la aplicación de la (21), (22) y (23). Los datos necesarios para determinar dichos valores se los toma de la simulación los cuales son:  $I_a = 0.87 [A]_{RMS}$ ,  $I_b = 0.96 [A]_{RMS}$ ,  $I_c = 3.47 [A]_{RMS}$ .

$$\text{Media de tres fases} = \frac{0.87 + 0.96 + 3.47}{3} = 1.7667 [A]_{RMS}$$

$$\text{Desviación máxima} = 1.7667 - 0.87 = 0.4267$$

$$(D\%) = \frac{0.4267}{1.7667} * 100 = 50.75 \%$$

Para analizar el desbalance que existe en el sistema de conversión con carga resistiva-capacitiva, se utiliza la Figura 37. A simple vista se observa un desbalance y al calcular el desbalance porcentual se obtiene un aproximado del 50,75 % de desequilibrio existente en el sistema, llegando a la conclusión que no se puede operar el sistema de conversión.

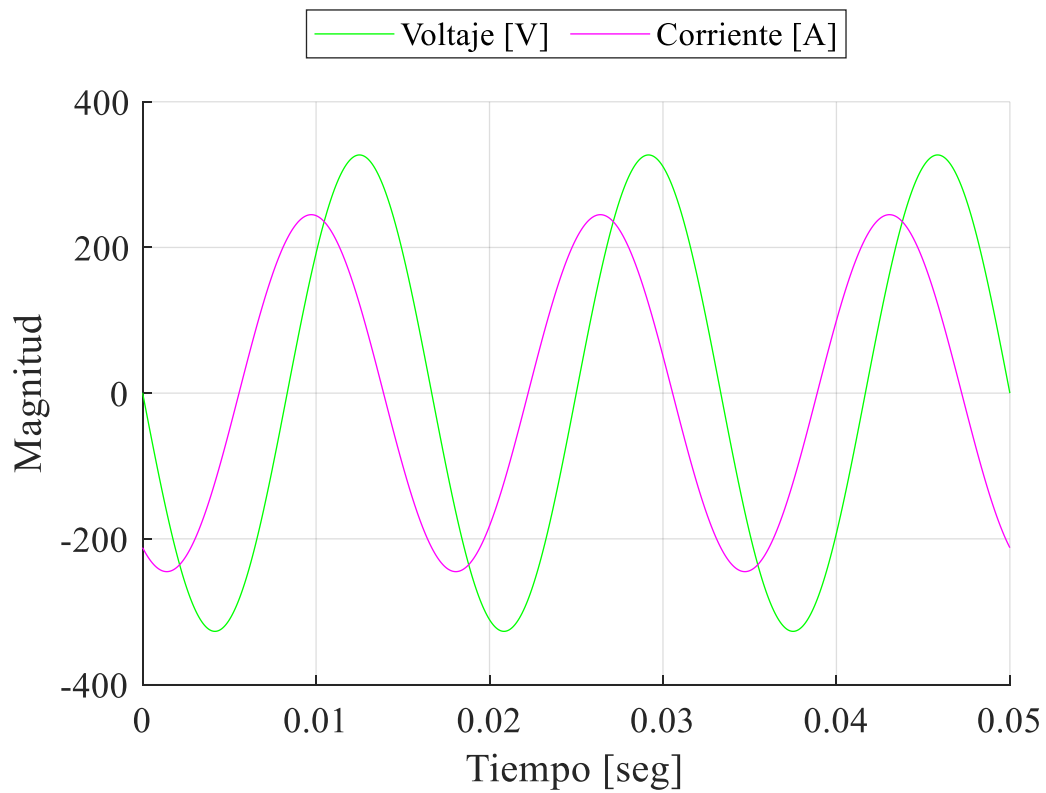


**Figura 38** Forma de onda de voltaje y corriente de fase A en circuito con carga resistivo-capacitiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

Para este caso de estudio con carga RC se observa un comportamiento similar al escenario con carga RL salvo que en este caso la fase afectada por el desbalance ocasionado por la carga es la fase A y su magnitud en voltaje es cuatro veces mayor que las fases «B» y «C».

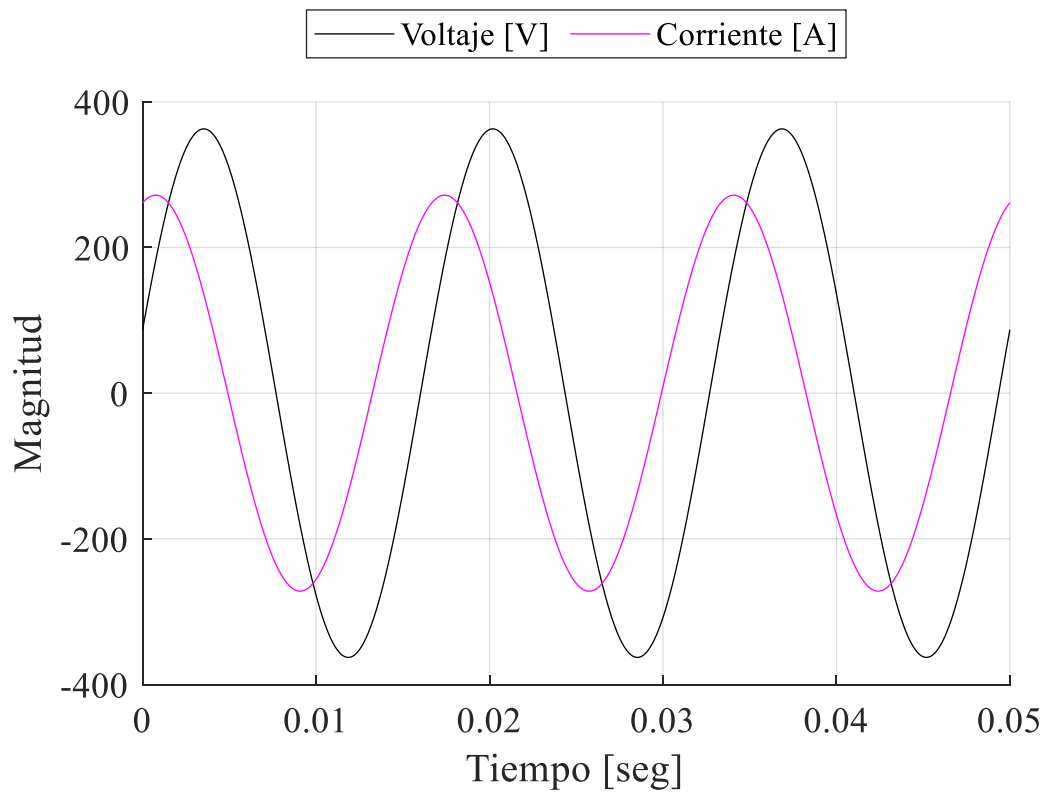
La corriente de fase «A» se encuentra en adelante respecto al voltaje, lo que se corresponde si se tiene una carga RC con factor de potencia en adelante.



**Figura 39** Forma de onda de voltaje y corriente de fase B en circuito con carga resistivo-capacitiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

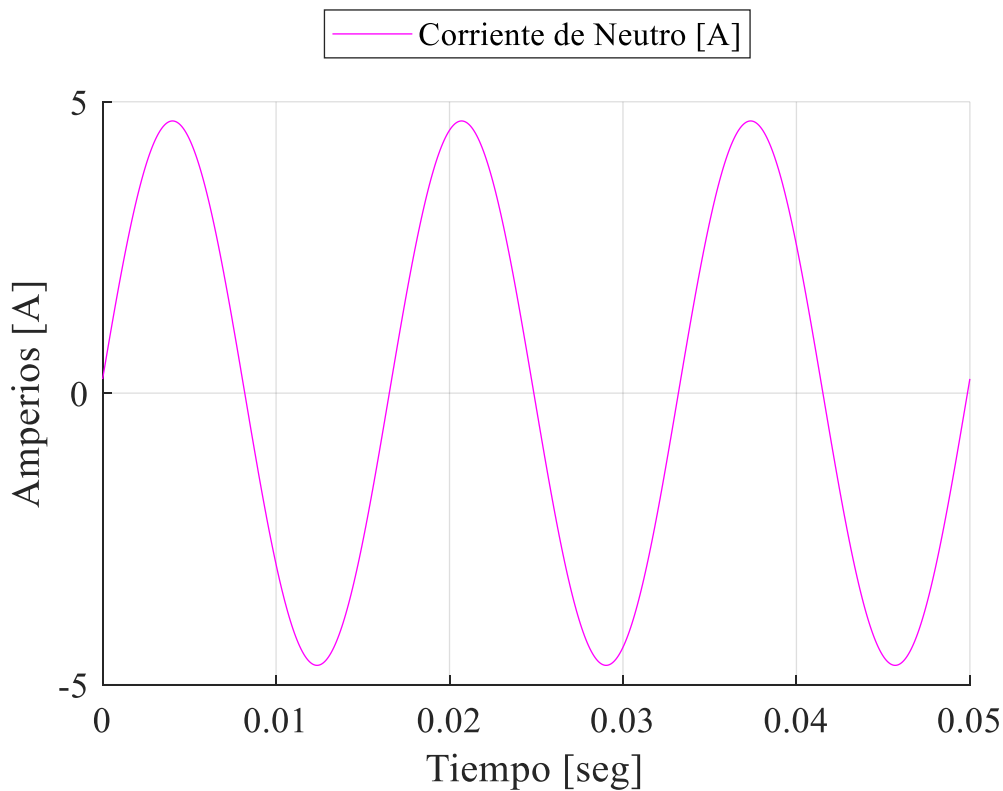
En la Figura 39 se analiza la fase «B» del sistema de conversión monofásico trifásico con carga RC. Se observa que el nivel de voltaje en esta fase se encuentra alrededor de los 300 [V].



**Figura 40** Forma de onda de voltaje y corriente de fase C en circuito con carga resistivo-capacitiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

Para el análisis de la fase «C» se toma en consideración la Figura 40, como se establece previamente el comportamiento que mostró el sistema con carga RC es el opuesto al sistema con carga RL.



**Figura 41** Forma de onda de corriente de neutro en circuito con carga resistivo-inductiva.

Elaborado por: Bruno Masabanda

Al igual que el escenario anterior, la corriente de neutro no es cero. Su amplitud casi llega a los 5 [A] tal como se ve en la Figura 41, un comportamiento propio de los circuitos desequilibrado.

#### **4.6 Análisis de los casos de estudio sobre el sistema de conversión.**

El primer caso de estudio del sistema de conversión fue con una carga nominal puramente resistiva tal como se puede ver en el apartado 4.3 donde se puede obtener los valores de  $L_a$  y  $C_c$ , los cuales son inductancia y capacitancia respectivamente mediante el valor de la carga, ya que con un valor establecido de carga permite sintonizar los parámetros que conforman el sistema de conversión para mantener el balance de los voltajes. Es por eso por lo que cuando se trabaja con una carga puramente resistiva donde se mantiene un valor nominal es posible la estabilidad continua del sistema.



Sin embargo, en el apartado 4.3.1 se trabaja de igual manera con una carga puramente resistiva, pero a la que se le cambia el valor nominal, la cual pasa de  $133.46\ \Omega$  a  $100\ \Omega$ , sin tomar en cuenta un recálculo de la inductancia y capacitancia  $L_a$  y  $C_c$ . El sistema de conversión no cumple las ecuaciones y los parámetros que intervienen en el mismo continúan trabajando, pero de acuerdo con los valores nominales previos. Es la razón por la que a pesar de trabajar con una carga puramente resistiva el sistema se desbalancea tal como se ve en la Figura 20. Llegando a la conclusión de que es esencial un recálculo de los parámetros de la inductancia y capacitancia con la finalidad de mantener un balance y adecuado funcionamiento del sistema.

En el caso de estudio del apartado 4.3.2 tiene la misma explicación anterior ya que existe una alteración del valor nominal de la carga puramente resistiva de  $133.46\ \Omega$  a  $150\ \Omega$ . El fenómeno que produce el desbalance en este caso de estudio es no cumplimiento de las ecuaciones que garantizan el balance al no realizar el recálculo de los parámetros  $L_a$  y  $C_c$ , ya que estos continúan operando bajo los valores nominales iniciales. Al no variar estos, dejan de trabajar de acuerdo con el nuevo valor nominal y por ende el desbalance es notorio tal como se demuestra en la Figura 23. Se llega a la misma conclusión antes mencionada, la cual es la importancia de un recálculo adecuado de parámetros y así mantener la sincronización y el balance cuando trabajamos con cargas puramente resistivas.

Otro de los casos de estudio fue una alteración del tipo de carga, es decir ya no trabajar con una puramente resistiva sino con una carga tipo RL (resistiva-inductiva) serie, como se ve en el apartado 4.4. Aquí se mantuvo los valores nominales de carga respecto a la parte resistiva y para la parte de la reactancia inductiva  $X_L$  fue necesario un cálculo mediante triángulo de impedancias con un factor de potencia 0.8 en atraso, como se realiza a partir de la Figura 28. Una vez obtenido el valor necesario para la simulación se

obtiene una gráfica de voltajes y corrientes que se muestra en la Figura 27 y Figura 29 respectivamente, donde es notorio el desbalance del sistema, pero este se debe a la alteración del tipo de carga ya que al trabajar con una carga RL tampoco se puede mantener la estabilidad del sistema con un recálculo de parámetros  $L_a$  y  $C_c$ , sino más bien se deben incluir maneras alternativas de compensación que puedan convertir la carga en resistiva.

Y por último se estudia el sistema de conversión con un cambio del tipo de carga puramente resistiva a una RC (resistivo-capacitivo) como se ve en la sección 4.5. De igual manera que el caso anterior es necesario un cálculo de capacitancia con un factor de potencia 0.8 en adelante utilizando el triángulo de impedancias como se ve en la Figura 36. Con el valor adecuado se procede a la simulación necesaria donde se denota el desbalance que existe al emplear este tipo de carga y se demuestra en los voltajes generados en la Figura 35 y las corrientes de igual manera generadas en la Figura 37, de igual manera que la sección anterior no es posible estabilizar el sistema con un recálculo de parámetros de inductancia y capacitancia, es decir que el desbalance se genera por el cambio de carga y para su estabilidad es necesario alternativas de compensación que permitan el correcto funcionamiento del sistema.

## CONCLUSIONES

Las simulaciones realizadas en este trabajo verifican la viabilidad del sistema de conversión en lo que concierne a cargas puramente resistivas, los resultados proporcionados por Simulink verifican la estabilidad del sistema ante cargas nominales ya establecidas, si existe alteraciones en los valores nominales es de suma importancia tomar en cuenta el recalcu de valores correspondientes a inductancia y capacitancia estos son fundamentales al momento de operación del sistema de conversión manteniendo la estabilidad constante en su funcionamiento.

La alimentación trifásica que provee el sistema de conversión a una carga del tipo resistiva con una red ideal equivalente monofásica, permite observar mediante resultados gráficos un sistema balanceado de tensiones y corrientes tanto como en magnitud y ángulo correspondiente a un sistema de secuencia positiva, dando apertura a la conexión de equipos, maquinarias y elementos necesarios que cumplan los requisitos, con la finalidad de aportar al desarrollo de producción en lugares de menos densidad poblacional donde una red trifásica es inexistente.

En este trabajo se verifica que el circuito de conversión monofásico a trifásico solo contiene elementos pasivos, así como un transformador monofásico de relación 2 a 1 con una conexión en polaridad inversa. No hay ningún circuito ni componente que opere como un conmutador, como sería el caso de un conversor o un circuito basado en la electrónica de potencia. Tampoco se presentan distorsiones en las formas de onda del voltaje ni de la corriente para el caso de una carga resistiva pura, con lo cual no es necesaria la medición de ninguna tasa de distorsión armónica ni en corriente ni en voltaje.

El sistema de conversión monofásico/trifásico presenta distorsiones, pero solo en la magnitud de las formas de onda del voltaje y por tanto de la corriente y estrictamente sucede en una de las fases del sistema, cuando el factor de potencia de la carga es en

atraso, así como cuando el factor de potencia de la carga es en adelanto. También se realizaron simulaciones para verificar cómo operaba el sistema de conversión ante cargas resistivas diferentes del valor nominal para el cual estaban ajustados los valores de los parámetros del sistema de conversión.

La propuesta de conversión circuital solo opera correctamente con cargas resistivas nominales, ya que según su valor establecido es posible calcular los parámetros de inductancia y capacitancia los cuales son fundamentales para mantener una estabilidad continua del sistema, por lo cual se afirma que este sistema de conversión está orientado según su carga. Un cambio en la carga resistiva respecto del valor nominal implica reajustar los valores de los parámetros de inductancia y capacitancia para que siga siendo balanceado en magnitud y en fases, si no se realiza este procedimiento y se mantiene los parámetros iniciales obligamos a trabajar al sistema de manera incorrecta generando problemas en maquinarias o cargas conectadas al sistema, además agregar la siguiente acotación, no es posible operar con cargas que no sean resistivas, es decir que operen con un factor de potencia diferente al unitario.

## **RECOMENDACIONES**

Se sugiere simular el circuito con la corrección del factor de potencia para cargas tipo RL y RC hasta que la carga opere equivalentemente como carga resistiva, con el objetivo de determinar si bajo ese escenario de cambio este sistema opera de forma estable, además es recomendable verificar la posibilidad de reproducir estas simulaciones en el Laboratorio de Circuitos Eléctricos de la UPS con el equipamiento apropiado, para verificar lo obtenido en las simulaciones con el fin de verificar el aporte que este proyecto genera, por último se puede considerar la posibilidad de idear un método para sintonizar automáticamente los parámetros respecto del valor de la carga resistiva que se alimente.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Aguila, J. W. Gonz, I. Isaac, y J. L. Gabriel, «Hybrid AC / DC microgrid test system simulation: grid-connected mode», vol. 5, n.º November, 2019.
- [2] W. A. Moncrief, «Practical application and selection of single-phase to three-phase converters», *Pap. - Rural Electr. Power Conf.*, pp. 1-9, 1996.
- [3] M. M. Santee y J. Rubens Macedo, «A review of single to three-phase conversion methods for supplying rural loads», *SBSE 2018 - 7th Brazilian Electr. Syst. Symp.*, n.º 3, pp. 1-6, 2018.
- [4] M. Bank, «Single Wire Electrical System», *Engineering*, vol. 04, n.º 11, pp. 713-722, 2012.
- [5] J. Wu y Y. Wang, «Three-Phase to Single-Phase Power-Conversion System», vol. 26, n.º 2, pp. 453-461, 2011.
- [6] A. K. Adapa y V. John, «Single phase to three phase power conversion using reduced rated inverters», *2015 IEEE Int. Conf. Signal Process. Informatics, Commun. Energy Syst. SPICES 2015*, vol. 1, 2015.
- [7] N. Rocha, C. B. Jacobina, y E. C. Dos Santos, «Single-phase to three-phase AC-DC-AC drive system based on parallel rectifiers with an uncontrolled shared-leg», *2015 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2015*, pp. 2588-2595, 2015.
- [8] N. Brand, D. Freitas, C. Brand, y A. Oliveira, «Six-Leg Single-Phase to Three-Phase Converter», vol. 53, n.º 6, pp. 5527-5538, 2017.
- [9] E. Cipriano, N. Rocha, y C. Brand, «Suitable Single-Phase to Three-Phase AC – DC – AC Power Conversion System», vol. 30, n.º 2, pp. 860-870, 2015.
- [10] T. D. C. Busarello, J. A. Heerdt, A. L. Batschauer, y M. Mezaroba, «Three-phase feeding system for rural electrification», *2009 Brazilian Power Electron. Conf. COBEP2009*, pp. 1046-1051, 2009.
- [11] J. Rodríguez, J. S. Lai, y F. Z. Peng, «Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, n.º 4, pp. 724-738, 2002.
- [12] P. Wolfs y F. Yang, «A single to three phase power converter with integrated storage and a PV interface for rural power applications», *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2014-Octob, n.º October, pp. 1-5, 2014.
- [13] Q. C. Zhong, W. L. Ming, y M. Krstic, «A single-phase to three-phase power conversion system with reduced switches and improved output voltages», *IEEE*

- Green Technol. Conf.*, pp. 386-391, 2013.
- [14] M. Udayagiri y V. Sarma, «Single Phase to Three Phase Conversion Without DC Filter», p. 4, 1977.
  - [15] E. C. Dos Santos, C. B. Jacobina, E. R. C. Da Silva, y N. Rocha, «Single-phase to three-phase power converters: State of the art», *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, n.º 5, pp. 2437-2452, 2012.
  - [16] L. Gu y K. Jin, «A Single-stage Three-phase AC / DC Converter With Y- $\Delta$  Three-phase Transformer», vol. 0, pp. 1845-1849, 2015.
  - [17] E. Cipriano, C. B. Jacobina, G. Arthur, D. A. Carlos, y I. S. De Freitas, «Component Minimized AC – DC – AC Single-Phase to Three-Phase Four-Wire Converters», *October*, vol. 58, n.º 10, pp. 4624-4635, 2011.
  - [18] K. Mozaffari y M. Amirabadi, «A versatile inductive-link three-phase converter topology», *2017 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 3476-3483, 2017.
  - [19] N. F. Ershad y R. T. Mehrjardi, «A low cost single-phase to three-phase power converter for low-power motor drive applications», *2018 IEEE Texas Power Energy Conf. TPEC 2018*, vol. 2018-Febru, pp. 1-6, 2018.
  - [20] S. Marinus y M. Malengret, «Using passive elements and control to implement single- to three-phase conversion», *IEEE AFRICON Conf.*, vol. 2, pp. 611-614, 1999.
  - [21] F. Z. Hamidon, I. H. M. Ali, M. N. Khadari, P. D. A. Aziz, y N. H. M. Yunus, «Design of single phase to three phase static power converter», *2014 4th Int. Conf. Eng. Technol. Technopreneuship, ICE2T 2014*, vol. 2014-Augus, n.º March 2019, pp. 266-271, 2015.
  - [22] M. Saito, «A novel single/three-phase matrix converter for high power integration», *2008 13th Int. Power Electron. Motion Control Conf. EPE-PEMC 2008*, n.º 1, pp. 2439-2444, 2008.
  - [23] A. Charles y M. Sadiku, *Fundamentos de Circuitos Eléctricos*. 2013.
  - [24] J. B. P. Pillay, «Induction Motor Performance When Fed From Single To Three Phase Converters», vol. 3, n.º 2, pp. 54-67, 1990.
  - [25] C. Chen, D. M. Divan, y D. W. Novotny, «A single phase to three phase power converter for motor drive applications», *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.)*, vol. 1992-Janua, pp. 639-646, 1992.
  - [26] S. T. Karris, *Circuit Analysis I with MATLAB® Applications*, n.º Ix. 2004.

- [27] S. T. Karris, *Circuit analysis II with MATLAB applications*, vol. 41, n.º 07. 2004.
- [28] W. C. M. Allan H. Robins, *Analisis De Circuitos*, vol. 1. 2013.
- [29] T. L. Floyd, *Principios de Circuitos Eléctricos*. 2007.
- [30] S. Bronshtein y B. Epshtein, «Single to Three Phase Conversion for Rural Power Applications», *2016 IEEE Int. Conf. Sci. Electr. Eng.*, pp. 1-4, 2016.
- [31] Intrónica, «Revista ElectroIndustria - FALLAS EN MOTORES ELÉCTRICOS: ¿El problema es el transmisor, el motor o la carga?» [En línea]. Disponible en: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2238&tip=7&xit=fallas-en-motores-electricos-el-problema-es-el-transmisor-el-motor-o-la-carga>. [Accedido: 02-dic-2020].
- [32] J. Suárez, «Estudio para el balanceo de la carga del alimentador Anconcito de 13.8 kV ubicado en el cantón Salinas provincia de Santa Elena.», 2019.
- [33] J. Arias y C. Pullaguari, «Análisis de la calidad de energía en la red de baja tensión del transformador #19597P, debido a la conexión del sistema de generación fotovoltaico para electromovilidad en la Universidad Politécnica Salesiana.», 2019.